



TUGAS AKHIR - SF 141501

**PEMETAAN ALIRAN SUNGAI BAWAH TANAH DI
DAERAH RENGEL-TUBAN DENGAN MENGGUNAKAN
METODE VERY LOW FREQUENCY-
ELECTROMAGNETIC (VLF-EM)**

**Normasari Wijayanti
NRP 1112100099**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
Dr. Sungkono M. Si**

**DEPARTEMEN FISIKA
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



TUGAS AKHIR - SF 141501

**PEMETAAN ALIRAN SUNGAI BAWAH TANAH DI
DAERAH RENGEL-TUBAN DENGAN MENGGUNAKAN
METODE VERY LOW FREQUENCY-
ELECTROMAGNETIC (VLF-EM)**

**Normasari Wijayanti
NRP 1112100099**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
Dr. Sungkono M. Si**

**DEPARTEMEN FISIKA
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT - SF 141501

**UNDERGROUND RIVER FLOW IMAGING IN THE
RENGEL-TUBAN AREA USING VERY LOW
FREQUENCY-ELECTROMAGNETIC (VLF-EM)
METHOD**

**Normasari Wijayanti
NRP 1112100099**

**Advisors
Prof. Dr. rer.nat . Bagus Jaya Santosa, S.U
Dr. Sungkono M. Si**

**Department of Physics
Faculty of Mathematics and Science
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

LEMBAR PENGESAHAN

PEMETAAN ALIRAN SUNGAI BAWAH TANAH DI DAERAH RENGEL-TUBAN DENGAN MENGGUNAKAN METODE VERY LOW FREQUENCY- ELECTROMAGNETIC (VLF-EM)

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Studi Geofisika
Program Studi S-1 Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

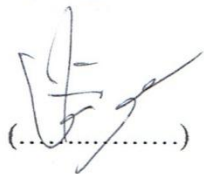
**Normasari Wijayanti
1112 100 099**

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.

()

2. Dr. Sungkono

()

Surabaya, Januari 2017



**PEMETAAN ALIRAN SUNGAI BAWAH TANAH DI
DAERAH RENGEL-TUBAN DENGAN MENGGUNAKAN
METODE VERY LOW FREQUENCY-
ELECTROMAGNETIC (VLF-EM)**

Penulis : Normasari Wijayanti
NRP : 1112100099
Departemen : Fisika FMIPA ITS
Dosen Pembimbing : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa,S.U
Dr. Sungkono M. Si

Abstrak

Salah satu kawasan karst di Indonesia terletak pada daerah Rengel–Tuban. Umumnya kawasan karst memiliki kekurangan air bersih, sehingga dibutuhkan metode geofisika untuk mengidentifikasi posisi reservoir air tanah. Salah satu reservoir air tanah pada karst ialah sungai bawah tanah. Metode geofisika yang sesuai adalah metode VLF-EM. Data pengukuran VLF-EM, perlu dilakukan proses filter NA-MEMD untuk memisahkan noise pada data VLF-EM secara simultan (pada data inphase dan quadrature). Setelah itu, dilakukan pengolahan data yaitu interpretasi kualitatif (filter Fraser dan filter K-Hjelt) dan interpretasi kuantitatif (Inversi). Aliran sungai bawah tanah tiap-tiap lintasan yang teridentifikasi berkorelasi dengan sinkhole dan arah jalur aliran sungai bawah tanah mengarah dari utara menuju selatan. Kedalaman sungai bawah tanah berkisar 5-20m.

Kata kunci : Fraser, K-Hjelt, NA-MEMD, VLF-EM

UNDERGROUND RIVER FLOW IMAGING IN THE RENGEL-TUBAN AREA USING VERY LOW FREQUENCY-ELECTROMAGNETIC (VLF-EM) METHOD

Name : Normasari Wijayanti
NRP : 1112100099
Departement : Fisika FMIPA ITS
Supervisor : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa,S.U
Dr. Sungkono M.Si

Abstract

One of the karst areas in Indonesia located in Rengel-Tuban. karst region generally lack of clean water. It takes a geophysical method for identify the position of the groundwater reservoir. One of groundwater in karst reservoir is underground river. Geophysical methods that able to identify is VLF-EM method. VLF-EM measurement data needs NA-MEMD filter process to separate the noise in the VLF-EM data simultaneously (data inphase and quadrature). After that, maintaining data with qualitative interpretation (Fraser filter and filter K-Hjelt) and quantitative interpretation (inversion). Every path of underground river that identified correlated with the sinkhole and the direction of the flow path of an underground river leads from north to south. Underground river depth has range 5-20m.

Keywords : *Fraser, K-Hjelt, NA-MEMD, VLF-EM*

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, sehingga dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir di jurusan Fisika FMIPA ITS dengan judul:

“PEMETAAN ALIRAN SUNGAI BAWAH TANAH DI DAERAH RENGEL-TUBAN DENGAN MENGGUNAKAN METODE VERY LOW FREQUENCY-ELECTROMAGNETIC (VLF-EM)”

Penulis menyadari bahwa terselesainya penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U selaku dosen pembimbing pertama tugas akhir dalam memberi bimbingan, dan wawasan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Sungkono M.Si selaku dosen pembimbing kedua yang sangat luar biasa dalam memberi dukungan, bimbingan, dan wawasan sehingga Penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. rer. nat. Eko Minarto dan Heru Sukamto M.Si selaku dosen penguji sidang Tugas Akhir ini.
4. Keluarga tercinta, Ibunda Tuminah, Ayahanda Katiran, Kakak pertama Siti Rumkanah, Kakak Kedua Lukman Junaidi, Kakak Ketiga Nurul Fitri Astuti, Suami dari Kakak pertama Donny Aguo Priatno, dan Istri dari Kakak kedua Siti Sabikis.
5. Bapak Dr. Yono Hadi P., M. Eng dan Dr. rer. nat. Eko Minarto, selaku Ketua Jurusan dan Seketaris Jurusan Fisika FMIPA ITS yang telah memberikan kemudahan sarana selama kuliah sampai terselesainya Tugas Akhir ini.

6. Bapak Endarko, M.Si., Ph.D. selaku dosen wali yang telah memberikan saran yang berhubungan dengan mata kuliah selama masa belajar Penulis.
7. Kepada teman-teman yang membantu saya dalam pengambilan data Tugas Akhir yaitu Nurul Huda, Rijalul Fikri, mas Nanang, mas Toriq, Yayan, dan Oman.
8. Teman satu bimbingan dan seperjuangan yaitu : Masyithah Noor W., Rijalul Fikri, Haiyin Hasbiyah, dan Venny Revianti, terimakasih atas semangat dan perjuangan yang telah kita lewati dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Teman saya yang sudah membantu dalam pembuatan power point untuk sidang yaitu Rayhan Sauqiyah Haf
10. Segenap teman-teman Fisika 2012 dan 2013 yang telah memberikan dukungan terbaik untuk penulis dan mengisi keseharian penulis dengan keceriaan dan kerjasama selama masa belajar Penulis.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan laporan ini terdapat kesalahan. Sehingga penulis meminta kritik dan saran pembaca yang dapat membantu untuk menyempurnakan laporan ini. Akhir kata semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua pihak. Aamiin Ya Rabbal Alamiin.

Surabaya, Januari 2017
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan masalah	3
1.5 Manfaat penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Geologi Regional Daerah Penelitian.....	5
2.2 Karst	6
2.3 Sungai Bawah Tanah	7
2.4 Metode VLF (Very Low Frequency)	10
2.4.1 Medan VLF-EM	12

2.4.2	Amplitude Medan Magnet Dan Fase	15
2.5	Noise Sinyal VLF-EM.....	18
2.6	Analisa Data VLF-EM.....	19
2.6.1	NA-MEMD	19
2.6.2	Analisa Kualitatif.....	20
2.6.3	Analisa Kuantitatif (Inversi)	22
BAB III METODOLOGI		29
3.1	Peralatan dan Bahan	29
3.2	Prosedur Kerja.....	30
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		35
4.1	Pengukuran Data VLF-EM.....	35
4.2	Pengelolaan Data	36
4.2.1	Data Pengukuran Lapangan	37
4.2.2	Filter NA-MEMD	38
4.2.3	Filter Fraser	40
4.2.4	Filter Karous-Hjelt.....	41
4.2.5	Inversi.....	42
4.3	Analisa dan Interpretasi Data.....	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		51
5.1	Kesimpulan.....	51
5.2	Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA		53
LAMPIRAN.....		57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Peta Geologi Lembar Tuban.....	5
Gambar 2.2	Skema Proses Pelarutan Batu Gamping.....	6
Gambar 2.3	Teori terbentuknya sungai bawah permukaan yang di dominasi karst (a) teori vadose, (b) teori Freatik Dalam (<i>Deep Phreatic Theory</i>), (c) teori freatik dangkal (<i>shallow Phreatic Theory</i>).....	8
Gambar 2.4	Medan elektromagnetik sekunder yang dihasilkan dari radiasi gelombang eketromagnetik.....	11
Gambar 2.5	Distribusi Medan Elektromagnetik untuk metode VLF-EM dalam polarisasi listrik dengan sinyal diatas sebuah dike konduktif vertikal.....	12
Gambar2.6	Hubungan amplitude dengan fase gelombang sekunder S dan gelombang primer P.....	16
Gambar 2.7	Parameter Polarisari Ellips.....	18
Gambar 3.1	Peralatan yang digunakan saat pengukuran (a) dan (b) satuset VLF-EM, (c) GPS, (d) Meteran, (e) Kompas Geologi.....	29
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 3.3	Desain Akuisisi Data VLF-EM.....	32
Gambar 4.1	Diagram alir pengolahan data VLF-EM.....	36
Gambar 4.2	Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 1.....	37
Gambar 4.3	Pemisahan noise dan nilai residu terhadap data pengukuran pada lintasan 1.....	39
Gambar 4.4	Plot data pengukuran dengan filter NA-MEMD pada lintasan 1.....	40
Gambar 4.5	Hasil filter fraser pada lintasan 1.....	41
Gambar 4.6	Hasil filter karous-hjelt pada lintasan 1.....	42
Gambar 4.7	Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 1.....	43

Gambar 4.8	Hasil filter Fraser pada tiap lintasan.....	44
Gambar 4.9	Hasil filter dengan Karous-Hjelt pada tiap lintasan.....	45
Gambar 4.10	Hasil inversi 2D bawah permukaan pada tiap lintasan.....	46
Gambar 4.11	Pemetaan aliran sungai bawah tanah di daerah Rengel-Tuban.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Parameter pengukuran data VLF-EM.....	35
--	----

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter	57
Lampiran 2 Hasil filter NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt.....	65
Lampiran 3 Hasil inversi 2D bawah permukaan.....	73
Lampiran 4 Dokumentasi pengukuran data lapangan	81

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Umumnya air memiliki peran yang penting di dalam kehidupan sehari-hari. Kebutuhan air selalu meningkat seiring dengan perkembangan pembangunan dan jumlah penduduknya. Namun terdapat beberapa wilayah memiliki kesulitan air bersih ketika memasuki musim kemarau. Daerah yang mengalami kesulitan air bersih ini, umumnya terjadi di daerah yang rata-rata didominasi dengan karst. Permasalahan utama dari kesulitan air bersih tersebut berdasarkan dari karakteristik sistem akuifer karst yang sulit ditebak (Adji dkk, 2015).

Salah satu kawasan karst yang ada di Indonesia berada di Rengel-Tuban. Secara geologi Rengel-Tuban merupakan daerah yang termasuk kedalam formasi Paciran. Formasi tersebut tersusun dari batu gamping pejal dan batu gamping dolomitan (Wijaya dkk, 2015). Karst (gamping) merupakan wilayah yang memiliki kondisi hidrologi dengan batuan yang mudah larut dan memiliki porositas sekunder yang berkembang dengan baik. Pembentukan karst tersebut dipengaruhi oleh proses pelarutan yang sangat tinggi dibandingkan dengan wilayah batuan tempat lain, serta adanya proses karstifikasi (Adji dan Suyono, 2004). Proses pelarutan pada batuan karst berpotensi menghasilkan air tanah, hal ini terjadi karena batuan tersebut memiliki porositas sekunder sehingga hasil pelarutannya akan membentuk rongga dengan diameter cukup besar dan air yang berada di atas permukaan akan mudah lolos ke bawah permukaan dan mengalirkan air dengan jumlah volume yang cukup besar (Ford dan Williams, 1989).

Dalam menyelesaikan permasalahan air bersih pada daerah yang didominasi karst maka dibutuhkan sebuah metode geofisika yang efektif dan efisien sesuai dengan keadaan topografi di daerah karst. Berdasarkan dari pengukuran geofisika dalam mengetahui struktur bawah permukaan terdapat beberapa metode

yang didasarkan dari sifat kelistrikan bumi, sifat kemagnetan bumi, getaran bumi, dan gelombang elektromagnetik (Santoso, 2004). Dari semua variasi metode pengukuran geofisika ini, metode pengukuran yang tepat yaitu metode VLF-EM (*Very Low Frequency-Electromagnetic*) (Santos, 2006). Metode ini digunakan dalam studi tentang lingkungan, studi arkeologi, studi geoteknik, mengidentifikasi sesar, dan sungai bawah tanah (Sungkono dkk, 2016). Metode tersebut memanfaatkan medan elektromagnetik yang dibangkitkan oleh pemancar-pemancar radio dengan frekuensi yang sangat rendah sekitar 15-30 Khz dengan pemancar radio yang berdaya besar sekitar 100-1000 KW (Indriyani, 2014). Metode tersebut diharapkan dapat membantu dalam memetakan jalur aliran sungai bawah tanah di daerah karst Rengel. Sehingga dari latar belakang diatas, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian yang berjudul “pemetaan aliran sungai bawah tanah daerah karst Rengel Tuban menggunakan metode *very low frequency-electromagnetic* (VLF-EM)”.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan pada penelitian tugas akhir ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana cara mengidentifikasi aliran sungai bawah tanah di daerah Karst Rengel menggunakan metode *Very Low Frequency-Elektromagnetic*(VLF-EM).
2. Bagaimana sistem sungai bawah tanah di daerah Karst Rengel, Tuban.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Mengidentifikasi aliran sungai bawah tanah di daerah Karst Rengel menggunakan metode *Very Low Frequency-Elektromagnetic* (VLF-EM).
2. Mengetahui sistem sungai bawah tanah di daerah Karst Rengel-Tuban.

1.4 Batasan masalah

Pada penelitian tugas akhir ini, memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Penerapan Metode VLF-EM untuk mengidentifikasi aliran sungai bawah tanah.
2. Analisa aliran sungai bawah tanah di daerah Karst Rengel Tuban.
3. Analisa pelapisan data VLF-EM menggunakan metode *noise assisted multivariate empirical mode decomposition* (NA-MEMD).
4. Analisa data VLF-EM terfilter dilakukan menggunakan metode optimasi.

1.5 Manfaat penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini diharapkan dapat bermanfaat bagi berbagai pihak, sehingga didapatkan manfaat dari penelitian ini diantaranya:

1. Mengembangkan pengetahuan yang terkait dengan aplikasi metode *Very Low Frequency-Elektromagnetic* (VLF-EM) untuk survey pemetaan aliran sungai bawah permukaan.
2. Memberikan rekomendasi bagi PEMDA untuk pengembangan masyarakat kawasan karst di Rengel yang di landa kesulitan air bersih ketika musim kemarau panjang.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada penulisan Tugas Akhir ini terdiri dari abstrak yang menggambarkan tentang gambaran umum dari penelitian ini. Bab I yang berisikan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan. Bab II berisikan tentang tinjauan pustaka yang berkaitan dengan dasar teori sebagai acuan dari penelitian. Bab III berisikan tentang metodologi. Bab IV berisikan tentang hasil penelitian dan pembahasannya. Dan Bab V berisikan tentang kesimpulan dan saran.

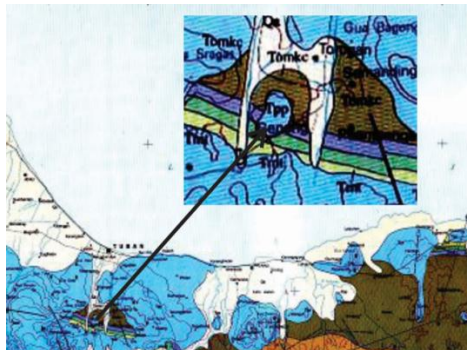
“ Halaman ini sengaja dikosongkan ”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional Daerah Penelitian

Daerah penelitian tugas akhir ini terletak di desa Rengel-Tuban, yang termasuk ke dalam zona Rembang (Sarmili dkk, 2010). Pada zona ini, umumnya membentuk struktur lipatan yang berupa antiklin yang berarah dari barat menuju timur dengan letak awalnya dari Purwodadi Jawa Tengah (Sarmili dkk, 2010) kemudian menuju Blora, Jatirogo, Tuban sampai daerah Madura (Wijaya dkk, 2015). Karena daerah Rengel-Tuban merupakan zona Rembang maka daerah tersebut memiliki daerah yang daratannya berupa perbukitan karst yang berbentuk bergelombang dengan diselingi oleh daratan rendah (Adji dkk, 2015). Dari bentuk geologi tersebut (Gambar 2.1) yaitu daerah penelitian tugas akhir termasuk kedalam formasi Paciran (Wijaya dkk, 2015). Formasi Paciran ini tersusun dari batu gamping pejal dan batu gamping dolomit. Batu gamping pada daerah Rengel dan sekitarnya merupakan antiklin yang terkikis dengan arah ketimur-barat dengan memiliki kemiringan semu sebesar 15° (Adji dkk, 2015).

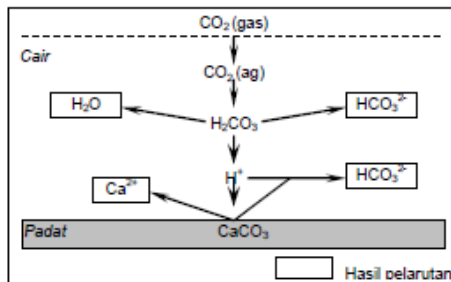
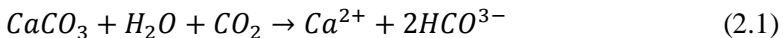


Gambar 2.1 Peta Geologi Lembar Tuban (Hartono dan Suharsono, 1997)

2.2 Karst

Berdasarkan dari bahasa Slavia, kata karst dapat disebut “Krs atau Kras” yang berarti wilayah yang daerahnya gersang berbatuan. Namun Ford dan Williams (1989) berpendapat lain bahwa karst merupakan wilayah yang memiliki keadaan hidrologi dengan batuan yang mudah larut dan memiliki porositas sekunder (kekar dan sesar intensif) sehingga air di permukaan tanah selalu merembes dan menghilang ke dalam tanah. Dalam proses pembentukan karst tersebut dipengaruhi oleh proses pelarutan dari batuan tersebut yang memiliki potensi sangat tinggi dibandingkan dengan wilayah batuan di tempat lain, serta terjadinya proses karstifikasi (Adji dan Suyono, 2004).

Karstifikasi merupakan proses pembentukan daerah karst yang didominasi oleh proses pelarutan dari batuan tersebut (Ford dan Williams, 1989). Trudgil (1985) menggambarkan proses dari pelarutan karst yang diawali dengan larutan CO_2 di dalam air kemudian membentuk H_2CO_3 . Dari larutan H_2CO_3 tersebut memiliki ketidakstabilan yang dapat terurai menjadi H^+ dan HCO_3^{2-} . Dengan adanya ion H^+ inilah dapat menguraikan H_2CO_3 menjadi Ca^{2+} dan HCO_3^{2-} . Sehingga proses pelarutan dirumuskan dengan reaksi sebagai berikut



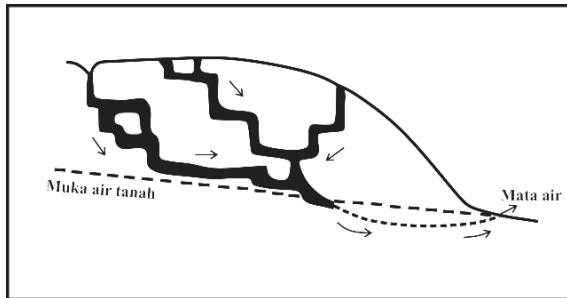
Gambar 2.2 Skema Proses Pelarutan Batu Gamping (Trudgil, 1985)

Dari proses krastifikasi terdapat dua faktor yang dapat mempengaruhinya yaitu berdasarkan dari faktor pengontrol dan faktor pendorong (Adji dan Suyono, 2004). Dari faktor pengontrol tersebut akan menentukan dapat atau tidaknya proses karstifikasi berlangsung. Sehingga faktor pengontrol ini dipengaruhi dari batuan mudah larut, ketebalannya, rekahannya, curah hujan, serta faktor batuan yang memiliki ketinggian berbeda yang kemungkinan adanya perkembangan sirkulasi air secara vertikal. Sedangkan faktor pendorong akan menentukan kecepatan dan kesempurnaan proses karstifikasi. Sehingga dari faktor pendorong dipengaruhi dari temperatur dan penutupan hutan (Ford dan Williams, 1989). Berdasarkan dari proses karstifikasi ini, maka diketahui ciri-ciri karst yaitu terdapat sejumlah cekungan tertutup atau lembah kering dengan ukuran yang bervariasi, ditemukannya sungai bawah permukaan dengan diketahui dari adanya gua kapur pada permukaan dan langkanya sungai permukaan (Trudgil, 1985).

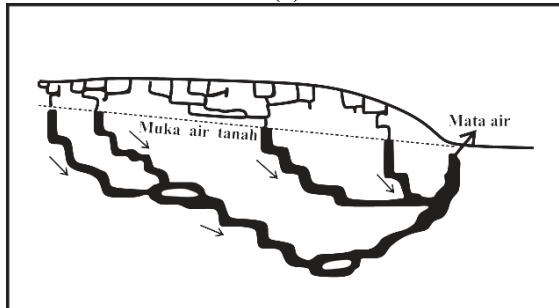
2.3 Sungai Bawah Tanah

Wilayah yang daerahnya berupa kawasan karst dapat ditemukan sebuah goa dan sungai bawah permukaan. Hal ini, karena karst memiliki ciri khas batuan yang memiliki banyak rongga serta mudah larut dengan air. sehingga mengakibatkan tidak berkembang sistem sungai permukaan namun menghasilkan sistem sungai bawah permukaan yang lebih dominan (Ford dan Williams, 1989).

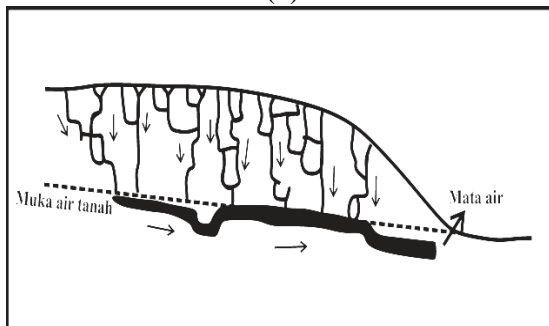
Air yang terdapat di batuan gamping bersifat dinamis, karena air tersebut bergerak dari permukaan sampai ke zona jenuh air. Pergerakan air ini, berdasarkan dari jalur yang dilalui air berpotensi terjadinya pelarutan batumannya sehingga dalam jangka waktu tertentu terbentuklah lubang yang diameternya cukup besar. Maka terbentuklah sistem sungai bawah tanah di daerah karst (Adji dan Suyono, 2004). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat dari Gambar 2.3 yang mengilustrasikan proses terbentuknya goa dan sungai bawah permukaan yang di dominasi karst.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.3 Teori terbentuknya goa dan sungai bawah permukaan yang di dominasi karst (a) teori vadose, (b) teori Freatik Dalam (*Deep Phreatic Theory*), (c) teori freatik dangkal (*shallow Phreatic Theory*) (Handayani, 2009)

Menurut Handyani (2007) terdapat teori dari proses terbentuknya sebuah goa dan sungai bawah tanah pada wilayah yang didominasi oleh karst. Pendapat tersebut terdiri dari tiga teori seperti pada Gambar 2.3 yang terdiri dari teori Vadus (*Vadose Theory*), teori Freatik Dalam (*Deep Phreatic Theory*) dan teori Freatik Dangkal (*Shallow Phreatic Theory*).

Teori Vadus (*Vadose Theory*) yang dapat dilihat pada Gambar 2.3(a) bahwa proses terbentuknya sebuah goa dan sungai bawah tanah diakibatkan oleh aliran air di permukaan karst kemudian masuk kedalam *swallow holes* (Adji dan Suyono, 2004). Aliran air tersebut mengfiltrasi secara vertikal kedalam tanah melalui lubang-lubang batuan kemudian menuju zona jenuh air. Ketika sampainya di zona jenuh air, maka air tersebut bergerak dengan arah horizontal dengan mengikuti celah-celah yang terdapat dari batuan seperti bidang perlapisan, kekar, retakan dan sebagainya. Berdasarkan dari pergerakan air ini, pada waktu yang bersamaan terjadinya proses pengikisan dan pelarutan dari batuan secara perlahan yang dilaluinya. Sehingga menghasilkan celah yang semakin luas dan dalam waktu yang lama dapat menghasilkan sebuah terowongan seperti goa. Dimana proses pelarutan tersebut terjadi di atas muka air tanah (Handyani, 2007).

Teori Freatik Dalam (*Deep Phreatic Theory*) pada Gambar 2.3(b) memiliki tiga tahapan terbentuknya goa dan sungai bawah tanah. Tahapan pertama merupakan tahap pelarutan, pada tahapan ini terjadinya proses pelarutan dari persebaran air pada bawah permukaan yang terletak di daerah zona freatik. Kemudian tahapan kedua merupakan tahap pengisian, dimana sudah terbentuknya sebuah goa atau lorong dengan diameter cukup besar yang sudah terisi air. Sehingga Airnya tidak mengalami pergerakan maka mengakibatkan pengendapan material berupa lempung yang berasal dari material yang terbawa oleh air saat terjadi proses pelarutan secara serentak. Tahapan ketiga merupakan tahap pengeringan, yaitu terjadinya proses penaikan lapisan tanah sehingga terjadinya pergeseran zona. Pergeseran zona ini, mengalami perubahan zonasi vertikal yaitu zona vadus

yang mengalami perluasan wilayah dengan bergeser ke bawah sehingga terjadi pengeringan goa. Sebagian material halus yang semula mengisi goa akan terbawa oleh air yang kembali bergerak dengan mengikuti aliran di zona vadus hingga arus tersebut mencapai alas batuan (Handyani, 2007).

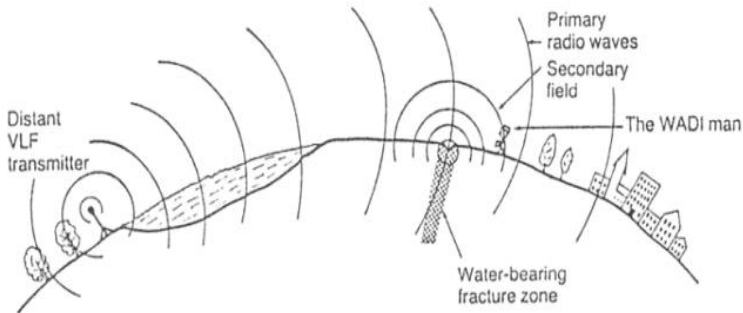
Teori ketiga yaitu teori freatik dangkal (*shallow Phreatic Theory*) yang diilustrasikan pada Gambar 2.3(c). Pada teori ini terdapat empat tahapan pembentukan goa dan sungai bawah tanah. Tahapan pertama merupakan tahap pelarutan batuan yang terjadi secara acak pada kedalaman tertentu secara vertikal ke bawah. Kemudian tahapan kedua merupakan penggabungan dan pengembangan dari hasil pelarutan yaitu berupa saluran-saluran goa. Setelah itu, pada tahapan ketiga merupakan tahap pengendapan material dan pengisian air pada saluran-saluran goa. Dan pada tahapan keempat merupakan tahap pengangkatan lapisan tanah dan erosi. Dalam tahapan keempat ini mengakibatkan saluran goa terangkat diatas level air tanah (Handyani, 2007).

2.4 Metode VLF (Very Low Frequency)

Metode VLF-EM memanfaatkan medan elektromagnetik yang dibangkitkan oleh pemancar-pemancar radio dengan frekuensi yang sangat rendah sekitar 15-30 Khz dengan pemancar radio yang berdaya besar sekitar 100-1000 KW (Wijaya, 2014; Zikri, 2013). Gelombang VLF yang dipancarkan oleh stasiun radio VLF akan menginduksi sistem pelapisan bumi yang konduktif (Ghufron, 2010).

Antena pemancar umumnya memiliki ketinggian sekitar 200-300m. Dari ketinggian menara tersebut memiliki panjang gelombang yang lebih besar daripada ketinggian menara tersebut (Wijaya, 2014). Sehingga sistem antena pada jarak yang cukup jauh dianggap sebagai dipole listrik vertikal yang arus listriknya mengalir dari kutub dan menuju ke kutub. Dari pola radiasi induksi ini menghasilkan medan elektromagnetik sekunder

sehingga menyebabkan gangguan medan elektromagnetik alamiah bumi (Ghufron, 2010).

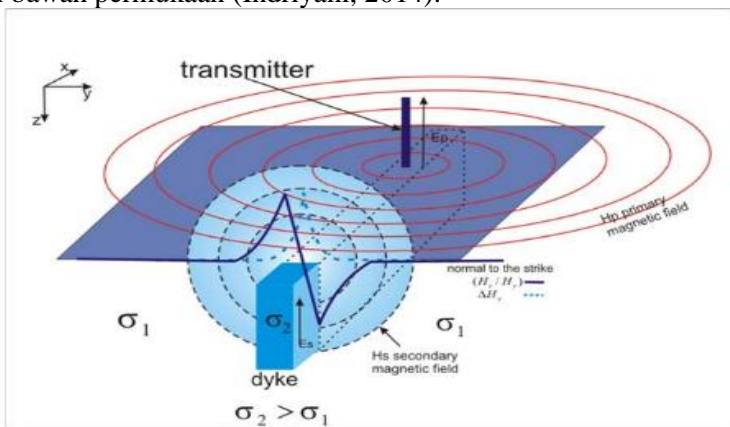


Gambar 2.4 Medan elektromagnetik sekunder yang dihasilkan dari radiasi gelombang elektromagnetik (Ghufron, 2010)

Prinsip pengukuran metode VLF-EM yaitu menggunakan hasil induksi elektromagnetik dengan frekuensi sekitar 15-30 KHz yang bersumber dari gelombang elektromagnetik. Kemudian hasil induksi elektromagnetik ini, dirambatkan diantara permukaan bumi dan ionosfer (Indriyani, 2014). Dari medan elektromagnetik primer pada pemancar radio ini, memiliki komponen medan listrik vertikal E_{pz} dan komponen medan magnetik horizontal H_{py} yang tegak lurus terhadap arah perambatan sumbu x. Sedangkan untuk jarak yang cukup jauh dari antenna pemancar yaitu komponen medan elektromagnetik primer dapat dianggap sebagai gelombang bidang yang berjalan secara horizontal (Wijaya, 2014; Zikri, 2013). Jika pada bawah permukaan didapatkan sebuah medium yang konduktif maka komponen medan magnetik dari gelombang elektromagnetik primer akan menginduksikan medium tersebut sehingga akan menimbulkan arus induksi (*Eddy Current*) E_{sx} (Indriyani, 2014; Wijaya, 2014; Zikri, 2013).

Pada Gambar 2.5 mengilustrasikan Arus induksi (*Eddy Current*) yang akan menimbulkan medan elektromagnetik sekunder (H_s) (Zikri, 2013) yang memiliki komponen horizontal dan komponen vertikal. Medan magnet tersebut memiliki bagian

yang sefase (*inphase*) dan beda phase (*quadrature*) dengan medan primer (Wijaya, 2014). Jika medan elektromagnetik sekunder (H_s) dapat ditangkap dipermukaan bumi, kemudian bergabung dengan medan elektromagnetik primer yang dibangkitkan tergantung dari besaran konduktivitas bawah permukaan (Indriyani, 2014). Besar kuat medan elektromagnetik sekunder sebanding dengan besarnya daya hantar listrik bawah permukaan, sehingga dengan mengukur kuat medan pada arah tertentu maka secara tidak langsung dapat mendeteksi daya hantar listrik batuan di bawah permukaan (Indriyani, 2014).



Gambar 2.5 Distribusi Medan Elektromagnetik untuk metode VLF-EM dalam polarisasi listrik dengan sinyal diatas sebuah dike konduktif vertikal (Wijaya, 2014; Zikri, 2013)

2.4.1 Medan VLF-EM

Metode pengukuran geofisika dalam menentukan lapisan bawah permukaan memiliki variasi berdasarkan dari sifat kelistrikan bumi, sifat kemagnetan bumi, getaran bumi dan gelombang elektromagnetik (Santoso, 2004). Salah satu metode yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik yaitu metode VLF-EM (*Very Low Frequency–Electromagnetic*) (Santos, 2006). Metode tersebut umumnya digunakan dalam studi tentang

lingkungan, studi arkeologi, studi geoteknik, mengidentifikasi sesar, dan sungai bawah tanah (Wijayanto dkk, 2015).

Bentuk perambatan gelombang elektromagnetik yang memiliki hubungan dengan vektor medan listrik dan medan magnetik adalah:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.3)$$

dengan E merupakan medan listrik (V/m), B merupakan induksi elektromagnetik (Wb/m²), t merupakan waktu (detik), H merupakan medan magnetik (A/m), J merupakan rapat arus listrik (A/m²), dan D merupakan Pergeseran listrik (C/m). Dari Persamaan (2.2) tersebut memiliki arti bahwa medan listrik yang timbul diakibat oleh medan magnetik yang berubah berdasarkan dari fungsi waktu. Sedangkan Persamaan (2.3) menunjukan bahwa medan magnetik yang terjadi didalam suatu lingkup wilayah ditimbulkan oleh aliran arus dan medan magnetik yang berbanding lurus dengan arus listrik totalnya (konduksi dan pergeseran).

Jika pada medium yang homogen isotropi, dimana $B = \mu H$, $D = \varepsilon E$, $J = \sigma E$. Maka Persamaan (2.2) dan (2.3) dapat disederhanakan menjadi:

$$\nabla \times E = -\mu \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) \quad (2.4)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right) \quad (2.5)$$

dengan μ merupakan permeabilitas magnetik (H/m), ε merupakan permetivitas (F/m), σ merupakan konduktivitas

(ohm/m). Dimana $(\partial E / \partial t) = i\omega E$ dan $(\partial H / \partial t) = i\omega H$ maka dari Persamaan (2.4) dan (2.5) akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\nabla \times E = -\mu i \omega H \quad (2.6)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon i \omega E = (\sigma + \varepsilon i \omega)E \quad (2.7)$$

dimana ω merupakan frekuensi sudut. Sehingga dari Persamaan (2.6) dan (2.7) akan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)i + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right)j + \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}\right)k = -i\omega\mu (H_x i + H_y j + H_z k) \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right)i + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right)j + \left(\frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x}\right)k = (\sigma + i\omega\varepsilon) (E_x i + E_y j + E_z k) \quad (2.9)$$

dengan mengasumsikan bahwa gelombang datar merupakan sebuah gelombang yang miring terhadap permukaan bumi dengan bidang y-z, serta pada arah sumbu x merupakan arah strike geolistriknya. Hal ini memiliki kaitanya dengan *Tranverse Electric*(TE) dan *Transverse Magnetic*(TM) yang berhubungan dengan medan vertikal elektrik dan magnetik menghilang (Ghufron, 2010).

Pada kasus 2D berlaku Persamaan (2.8) dan (2.9) yang menganggap $\partial / \partial x = 0$, sehingga hasil dari pembagi *Tranverse Electric* (TE) dan *Transverse Magnetic* (TM) dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu i \omega H_x \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu i \omega H_y \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu i \omega H_z \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = (\sigma + \varepsilon i \omega) E_x \quad (2.13)$$

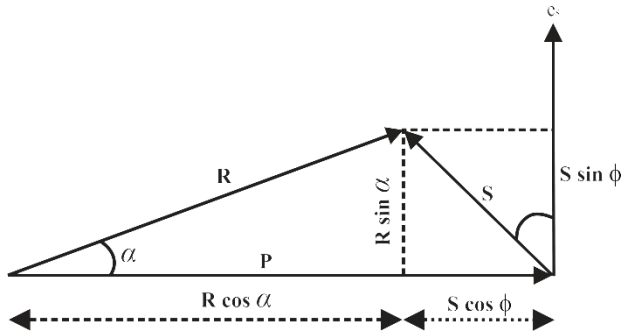
$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = (\sigma + \varepsilon i \omega) E_x \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial y} = (\sigma + \varepsilon i \omega) E_z \quad (2.15)$$

dari Persamaan (2.11) dan (2.12) merupakan mode *Transverse Electric* (TE), sedangkan pada Persamaan (2.14) dan (2.15) merupakan mode *Transverse Magnetic* (TM). Penjalaran gelombang dari alat VLF termasuk dalam mode TE karena output alat VLF berupa data triper berbilangan kompleks akibat polarisasi antara H_z dan H_y yang membentuk lingkaran atau *ellips*.

2.4.2 Amplitude Medan Magnet Dan Fase

Ciri khas gelombang elektromagnetik pada metode VLF-EM yaitu ketika gelombang primer (H_p) masuk kedalam medium yang berada di bawah permukaan, kemudian muncul gaya gerak listrik (ggl) induksi dengan frekuensi yang sama, namun memiliki fase yang tertinggal 90° (Wijaya, 2014). Dari Gambar 2.6 menunjukkan diagram vektor antara medan primer P dan ggl induksinya.



Gambar 2.6 Hubungan amplitude dengan fase gelombang sekunder S dan gelombang primer P (Wijaya, 2014)

dengan memisalkan $Z = R + i\omega L$ adalah impedansi efektif dari sebuah konduktor yang memiliki tahanan R dan induktansi L , maka arus induksi (*eddy current*) akan menjalar dalam medium dan menghasilkan medan sekunder S . Pada medan sekunder S ini, mempunyai fase yang tertinggal sebesar ϕ yang besarnya bergantung berdasarkan dari sifat kelistrikan medium.

$$\tan \phi = \frac{\omega L}{R} \quad (2.16)$$

Sehingga didapatkan total beda fase antara medium P dan S akan menjadi $90^\circ + \tan \phi = \omega L / R$.

Berdasarkan hal tersebut bahwa jika terdapat medium yang sangat konduktif maka beda fasenya akan mendekati 180° dan apabila medium kurang konduktif maka beda fasenya mendekati 90° . Dengan adanya kombinasi antara P dan S akan membentuk resultan R, sehingga komponen R yang sefase dengan komponen P ($R \cos \alpha$) dapat disebut sebagai komponen real (*in-phase*) dan komponen yang tegak lurus P ($R \sin \alpha$) disebut sebagai komponen imajiner (*quadrature*). Komponen yang diukur di dalam VLF-EM adalah *tilt angle* (α), sehingga *tilt angle* (α) ini dinyatakan sebagai sudut utama polarisasi ellips dari horizontal (dalam derajat atau persen). Sedangkan untuk eliptisitas (ε) dinyatakan sebagai

perbandingan antara sumbu kecil terhadap sumbu besarnya (persen). Pada *tilt angle* (α) dan eliptisitas (ε) ini, memiliki kaitan dengan komponen medan magnetik horizontal, vertikal, dan fasanya. Dalam matematisnya dapat diketahui bahwa *tilt angle* (α) mirip dengan bagian komponen real (*in-phase*) dari komponen vertikal, sedangkan eliptisitas (ε) mirip dengan bagian komponen imajiner (*quadrature*) dari komponen vertical.

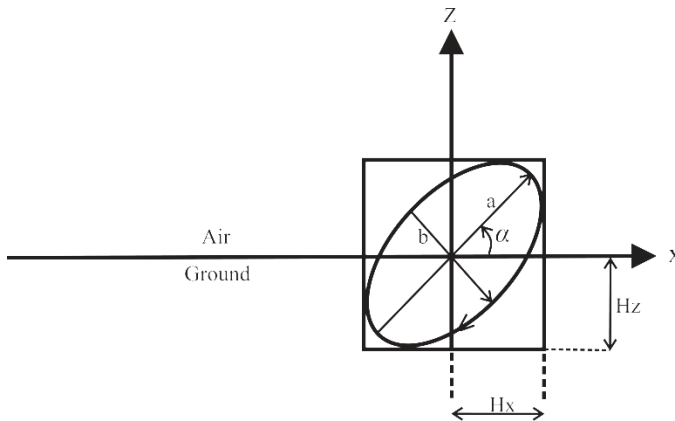
Jika medan magnet horizontal (H_x) dan medan magnetik (H_z) memiliki besar sudut tilt seperti pada Gambar 2.6 yang besarnya adalah:

$$\tan(2\alpha) = \frac{2\left(\frac{H_z}{H_x}\right) \cos \phi}{1 - \left(\frac{H_z}{H_x}\right)^2} \times 100\% \quad (2.17)$$

Dan besar eliptisitasnya adalah sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{b}{a} = \frac{H_z H_x \sin \phi}{\left[H_z e^{i\phi} \sin \alpha + H_x \cos \alpha\right]^2} \times 100\% \quad (2.18)$$

Sehingga tangen dari sudut tilt dan eliptisitas digunakan untuk membandingkan komponen medan magnetik sekunder S vertikal dengan medan magnetik primer P horizontal serta membandingkan komponen kuadrat dari medan sekunder S vertikal terhadap medan primer P horizontal (Indriyani, 2014).



Gambar 2.7 Parameter Polarisasi *Ellips* (Indriyani, 2014)

Dalam memperkirakan kedalaman yang dapat dijangkau oleh gelombang VLF-EM pada medium dengan konduktif maka dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut:

$$2d = (2\rho/\omega\mu)^{1/2} = 503(\rho/f)^{1/2} \quad (2.19)$$

dengan ω merupakan frekuensi angular, μ merupakan permeabilitas magnetik dari ruang kosong, ρ merupakan resistivitas medium, dan f merupakan frekuensi eksplorasi dalam Hz (Wijaya, 2014).

2.5 Noise Sinyal VLF-EM

Berdasarkan dari pengaruh bentuk bumi yang bulat ini, dapat mengakibatkan sinyal VLF dapat terdeteksi di jarak yang cukup jauh. Hal tersebut dapat terjadi karena akibat dari keberadaan elektron bebas di ionosfer yang menyebabkan reaksi pada lapisan pemantul di frekuensi VLF (Ghufron, 2010). Sehingga sumber utama noise tersebut adalah radiasi medan elektromagnetik yang diakibatkan dari pelepasan petir di atmosfer yang berada di tempat dekat atau jauh dari lokasi pengukuran, hal ini menyebabkan melemahkan sinyal yang dipancarkan oleh

pemancar (Fariz, 2008; Wijaya, 2014). Dari gangguan tersebut dapat diketahui dengan adanya kenaikan kuat medan listrik vertikal dan medan magnet horizontal secara tiba-tiba, apabila sumber medan di jarak yang cukup dekat dengan pengukuran. Kemudian noise yang selajutnya adalah terdapat penggabungan antara pola pelepasan Petir dan Guntur di atmosfer. Dimana pola pelapasan petir merupakan variasi dari aktifitas badai Guntur yang bergerak disepanjang permukaan bumi dari timur ke barat (Wijaya, 2014). Sehingga pada umumnya gangguan tersebut dapat terjadi secara perlahan selama malam hari dan akan menurun gangguan tersebut yang dapat terjadi sekitar jam 08.00 waktu lokal, kemudian naik secara cepat sampai maksimum sekitar pukul 16.00 waktu lokal (Fariz, 2008; Wijaya, 2014).

2.6 Analisa Data VLF-EM

Agar data VLF-EM dapat interpretasikan maka data yang didapatkan dari hasil pengukuran dapat diolah terlebih dahulu. Ketika pengukuran dilakukan dengan menggunakan metode VLF-EM maka pada saat itu, terdapat noise yang berpengaruh dari hasil nilai VLF yang terukur. Sehingga perlu dilakukan interpretasi data secara kuantitatif dan kualitatif (Rochman dkk, 2014).

2.6.1 NA-MEMD

Rehman dan Medic (2011) mengusulkan tentang algoritma multivariat EMD yang berguna untuk menguraikan sinyal dari data multivariat (lebih dari dua sinyal) secara bersamaan (Sungkono dkk, 2014). Sedangkan pada metode MEMD ini dibuat untuk menguraikan sinyal trivariat atau lebih, namun MEMD juga dapat digunakan untuk menurunkan IMFs univariat dan bivariat dengan menambahkan jumlah saluran yang mengandung *White Gaussian Noise* (Rehman dan Mandic, 2011; Wijayanto dkk, 2015), pendekatan ini dapat disebut sebagai *noise-assited MEMD*. *Noise-assited MEMD* mempunyai kemampuan untuk meningkatkan hasil penguraian data univariat

dan bivariat, maka pendekatan tersebut dapat mengurangi permasalahan dari *mode mixing* dalam data univariat serta mengurangi *mode mixing* dan *mode misalignment* untuk data *bivariate* (Sungkono dkk, 2014). Untuk sinyal univariat, IMFs didapat dari EMD yang memberikan respon frekuensi yang sama dengan bank filter diadik jika ditambahkan *white Gaussian noise*. IMFs memiliki kesamaan dengan EMD, dimana IMFs diturunkan dari sinyal multivariat dengan menggunakan metode NA-MEMD untuk WGN mengikuti struktur Bank filter diadik kuasi (Rehman dan Mandic, 2011). Sehingga algoritma NA-MEMD adalah sebagai berikut:

1. Membuat Gaussian white noise time-series tak kolerasi (m-channel) dari panjangnya yang sama dengan panjang input.
2. Tambahkan saluran noise (m-channel) yang dibuat pada langkah 1 ke sinyal masukan multivariate (n-channel), sehingga diperoleh $(n + m)$ -channel sinyal multivariate.
3. Proses sinyal multivariat $(n+m)$ -channel sinyal multivariat dihasilkan menggunakan algoritma MEMD untuk mendapatkan IMF multivariate.
4. Dari $(n+m)$ -channel IMF multivariate yang dihasilkan, buang m-channel yang bersesuaian dengan noise. Sehingga memberikan satu set n-channel IMF yang sesuai dengan sinyal asli.

2.6.2 Analisa Kualitatif

Dari data metode VLF-EM dapat dilakukan dengan interpretasi secara kualitatif. Interpretasi tersebut umumnya dilakukan dengan menggunakan Filtering. Salah satu contoh dari Filtering tersebut adalah filter Fraser dan filter Karous-Hjelt (Rochman dkk, 2014).

Filter Fraser didesain untuk melemahkan panjang gelombang yang terlalu besar dalam mengurangi efek topografi dan diaplikasikan pada data *tilt-angle*. Dengan *tilt-angle* merupakan hasil dari polarisasi elipstik medan magnetik bawah permukaan (Purwanto dkk, 2015). Salah satu contoh

permasalahan yang dapat diselesaikan dalam metode VLF-EM dengan menggunakan filter Fraser yaitu ketika titik *tilt-angle* mengalami persilangan dari polaritas positif menjadi negatif diinterpretasikan sebagai posisi konduktor yang menyebabkan anomali. Ketika dalam suatu wilayah yang ditinjau, berdasarkan dari letak semua titik nol (*inflection point*) tidak dapat diidentifikasi dengan mudah (Zikri, 2013).

Berdasarkan dari prinsip yang dimiliki filter Fraser yaitu dengan mengubah crossover dari data tripper yang akan menjadi respon puncak pada polarisasi magnetik ellips yang berada di sepanjang lintasan survey. Filter tersebut menghitung gradient horizontal dan menghaluskan data sehingga menghasilkan nilai maksimum di atas konduktor yang dapat dikonturkan (Zikri, 2013). Pada umumnya filter Fraser menggunakan 4 buah titik yang berurutan, dengan cara mengurangi jumlah dari nilai data ke-3 dan ke-4 terhadap jumlah dari nilai data ke-1 dan ke-2. Setelah itu, di plotkan di titik tengah antara data ke-2 dan ke-3 (Khalil dan Santos, 2010). Maka secara matematisnya dalam pengeplotan filter Fraser dapat dilakukan sebagai berikut:

$$F_n = (M_{n+2} + M_{n+3}) - (M_n + M_{n+1}) \quad (2.20)$$

Filter Karous-Hjelt merupakan suatu filter yang dikembangkan dengan desain medan magnetic yang berhubungan dengan aliran arus listrik (Purwanto dkk, 2015). Pada filter tersebut menggunakan teori linear untuk menyelesaikan permasalahan integral atas distribusi arus. Sehingga filter ini, menghasilkan variasi rapat arus di setiap kedalaman yang diturunkan dari komponen vertikal medan magnetik di setiap titik pengukuran (Zikri, 2013). Berdasarkan dari spasi jarak antar titik akan berpengaruh terhadap ketebalan yang dapat dijangkau arus. Sehingga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\left[\frac{\Delta Z}{2\pi} \right] I_a \left(\frac{\Delta x}{2} \right) = -0.102M_{n-3} + 0.059M_{n-2} - 0.561M_{n-1} \\ + 0.561M_{n+1} - 0.059M_{n+2} + 0.102M_{n+3} \quad (2.21)$$

dengan $M_n = H_z/H_x$ merupakan nilai yang terukur pada alat, ΔZ merupakan ketebalan jangkauan arus, Δx merupakan jarak antar titik-titik data, dan I_a merupakan rapat arus.

Dari kedua hasil filter Fraser dan filter Karous-Hjelt tersebut digunakan untuk mengidentifikasi anomali secara lateral maka dibutuhkan tahap lebih lanjut yaitu analisa kuantitatif (inversi) dengan menggunakan software In2DVLf (Zikri, 2013) sehingga di dapatkan hasil berupa nilai resistivitas 2D (Wijaya, 2014).

2.6.3 Analisa Kuantitatif (Inversi)

Inversi merupakan suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika untuk mendapatkan sebuah informasi yang berguna dalam mengetahui distribusi sifat fisis bawah permukaan (Supriyanto, 2007). Hasil pengukuran lapangan sangat bergantung pada kondisi dan sifat fisis dari lapisan bawah permukaan (Grandis, 2009). Dalam mengetahui lapisan bawah permukaan dibutuhkan parameter fisis yang berkaitan dengan resistivitas semu dan fase TE yang merupakan nilai resistivitas batuan. Sehingga untuk memodelkan parameter fisis tersebut maka dilakukan terlebih dahulu dengan diskritisasi (mengubah bentuk analog menjadi diskrit) parameter fisis dari lapisan bumi tersebut (Ghufron, 2010).

Pada permasalahan inversi medan elektromagnetik yaitu persamaan inversi non-linear dengan pendekatan linear yang berhubungan dengan data observasi, dan parameter model (Sasaki, 2001). Sehingga hubungan data dengan parameter model yang tidak linear dapat dinyatakan pada persamaan sebagai berikut:

$$\Delta d = A \Delta m \quad (2.22)$$

dengan Δd merupakan selisih antara model dengan data observasi, dan Δm merupakan selisih model awal m^k dengan model m^{k+1} resistivitas suatu batuan.

Untuk memecahkan permasalahan inversi pada Persamaan (2.22) dengan meminimalisasi fungsi objektif yang dinyatakan pada persamaan sebagai berikut:

$$U = \|W_d(A\Delta m - \Delta d)\|^2 + \lambda \left[\|Cm^{(k+1)}\| + \alpha \|W_m(m^{(k+1)} - m_b)\|^2 \right] \quad (2.23)$$

dengan W_d merupakan data matrik pembobot pada diagonal yang terdiri dari data standard deviasi atau data amplitudo jika diasumsikan memiliki presentase yang sama dengan standar deviasi. C merupakan operator kedua perbedaan yang digunakan untuk mendefinisikan model kekasaran. W_m merupakan matrik pembobot diagonal yang digunakan untuk mengontrol kedekatan ke *background* atau model awal (m_b) dan untuk mengurangi matrik identitas jika pembobot yang sama untuk semua parameter model. λ merupakan Lagrange multipler, sedangkan α merupakan kontrol relatif antara model *smoothness* dan *closeness* dengan model *background*. Jika Persamaan (2.23) diminimumkan nilai error dengan syarat $\frac{\partial U}{\partial \Delta m} = 0$, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} (A^T W_d^T W_d A + \lambda C^T C + \lambda \alpha W_m^T W_m) \Delta m = A^T W_d^T W_d \Delta d - \lambda C^T C m^{(k)} \\ + \lambda \alpha W_m^T W_m (m_b - m^{(k)}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Pada Persamaan (2.24) untuk Δm setara dengan solusi *least-square*.

$$\tilde{A} \Delta m = \tilde{\Delta d} \quad (2.25)$$

dimana:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} W_d A \\ \sqrt{\lambda} C \\ \sqrt{\lambda \alpha} W_m \end{bmatrix}, \Delta \tilde{d} = \begin{bmatrix} W_d \Delta d \\ -\sqrt{\lambda} C m^{(k)} \\ \sqrt{\lambda \alpha} W_m (m_b - m^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

dengan vektor Δm merupakan penambahan m_k untuk mendapatkan parameter terbaru $m^{(k+1)}$. Dengan k banyaknya iterasi yang digunakan untuk mencapai ukuran misfit berkurang ke tingkat yang di tentukan. Sehingga Persamaan (2.25) merupakan persamaan yang berlaku hubungan linear antara data dan parameter model.

Santos (2006) telah mengembangkan perangkat lunak Inv2DVLV yang digunakan dalam penggambaran secara kuantitatif menggunakan frekuensi tunggal pada data VLF-EM. Perangkat lunak ini, menggunakan metode inversi yaitu least-squares. Sehingga didapatkan hasil berupa model resistifitas 2-D yang memiliki kergantungan berdasarkan model resistifitas awalnya (Wijaya, 2014). Namun pada saat ini, Inv2DVLV sudah dikembangkan berdasarkan solusi ke depan dengan menggunakan FEM (*Finnite Element Method*). FEM (*Finnite Element Method*) umumnya digunakan untuk menyederhanakan permasalahan secara numerik dengan hasil yang mendekati analitik (Ghufron, 2010). Pemodelan inversi tersebut bertujuan untuk memperoleh model resistifitas 2-D struktur bawah permukaan dari data lapangan yang diperoleh dan nilai eror data yang terendah (Santos, 2006).

FEM (*Finnite Element Methode*) pada umumnya digunakan untuk menyederhanakan permasalahan secara numerik dengan hasil yang mendekati analitik (Ghufron, 2010). Penyelesaian Persamaan yang digunakan FEM adalah:

$$K\{E_x\} = s \quad (2.27)$$

dimana, K merupakan sebuah matrik jarang yang memiliki ukuran $N \times N$ dengan memiliki variable posisi dan resistivitas batuan. Dan s merupakan *boundary conduction* dengan memiliki ukuran matrik $N \times 1$ dengan N merupakan banyaknya nilai E_x yang diketahui. Dalam mengestimasi E_x akan ada kemungkinan mengalami permasalahan, hal tersebut dapat terjadi jika matrik K bersifat singular (Wijaya, 2014). Sehingga dalam mengestimasi E_x dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Quasi-Minimal Residual* (QMR), dekomposisi LU atau metode *Biconjugate-Gradient* (Ghufron, 2010).

Dalam mengestimasi H_z dan H_y dengan menggunakan metode FEM (Wijaya, 2014). Dapat menyatakan H_z melalui a_k dan E_x sedangkan H_y melalui b_k dan E_x . Sehingga di peroleh Persamaan sebagai berikut:

$$a_k^T E_x = H_z^k \quad (2.28)$$

$$b_k^T E_x = H_y^k \quad (2.29)$$

pada matrik a_k^T dan b_k^T memiliki ukuran $N \times N$. Dengan mengestimasi H_z dan H_y pada Persamaan (2.29) dan (2.30) dapat dilakukan dengan perkalian matrik biasa. Setelah itu, dilakukan estimasi jacobian yang diusulkan oleh Rodi dan Mackie (2001). Datum VLF atau impedansi ke- k yang digunakan untuk suatu model m yang dinyatakan sebagai komponen horizontal elektrik atau magnetik dari TE . Sehingga di dapatkan Persamaan (2.30).

$$Z^k(m) = \frac{a_k(m)^T E_x(m)}{b_k(m)^T E_x(m)} \quad (2.30)$$

dengan $a_k(m)$ dan $b_k(m)$ merupakan vektor koefisien perhitungan diferensial sentral dari medan pendukung pada impedansi jenis medan TE . Dari *input* matrik *Jacobian* yang

digunakan untuk impedansi ke- k terhadap parameter model ke- 1, dapat dihitung sebagai Persamaan (2.31)

$$J^{kl}(m) = \frac{\partial Z^k(m)}{\partial m^l} = \frac{1}{b_k^T E_x} \frac{\partial(a_k^T)}{\partial m^l} - \frac{a_k^T E_x}{(b_k^T E_x)^2} \frac{\partial(b_k^T E_x)}{\partial m^l}$$

$$= \left(\frac{1}{b_k^T E_x} \frac{\partial a_x}{\partial m^l} - \frac{a_k^T E_x}{(b_k^T E_x)^2} \frac{\partial b_k}{\partial m^l} \right)^T + \left(\frac{a_x}{b_k^T E_x} - \frac{a_k^T E_x b_k}{(b_k^T E_x)^2} \right)^T \frac{\partial E_x}{\partial m^l} \quad (2.31)$$

dengan memisalkan:

$$C_k = \frac{a_x}{b_k^T E_x} - \frac{a_k^T E_x b_k}{(b_k^T E_x)^2} \quad (2.32)$$

$$d^{kl} = \frac{1}{b_k^T E_x} \frac{\partial a_x}{\partial m^l} - \frac{a_k^T E_x}{(b_k^T E_x)^2} \frac{\partial b_k}{\partial m^l} \quad (2.33)$$

pada Persamaan (2.33) di turunkan terhadap m, maka didapatkan Persamaan sebagai berikut:

$$K \frac{\partial X}{\partial m^l} = - \frac{\partial K}{\partial m^l} E_x + \frac{\partial s}{\partial m^l} \quad (2.34)$$

dari Persamaan (2.34) ini dapat disubstitusikan ke dalam Persamaan (2.31) sehingga dihasilkan matrik *Jacobian* seperti persamaan sebagai berikut:

$$J(m) = d_{kl}^T E_x + C_k^T K^{-1} \left(- \frac{\partial K}{\partial m^l} E_x + \frac{\partial s}{\partial m^l} \right) = d_{kl}^T E_x + U_k^T \left(- \frac{\partial K}{\partial m^l} E_x + \frac{\partial s}{\partial m^l} \right) \quad (2.35)$$

di dalam perhitungan dari u_k yang menjadi solusi permasalahan *forward modeling* $K^T u_k = C_k$ dengan memanfaatkan sifat timbal

balik dari permasalahan ke depan yaitu simetrisitas matrik sistem K dan inversinya. Maka perhitungan dari u_k untuk $k = 1, \dots, N$ secara cepat dari perhitungan pada Persamaan (2.31) untuk $l = 1, 2, 3, \dots, M$ dalam kasus 2-D yang termasuk dalam *under determined*. Pada *under determined* memiliki sifat yang jumlah parameter model melebihi jumlah data atau $M > N$.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

3.1 Peralatan dan Bahan

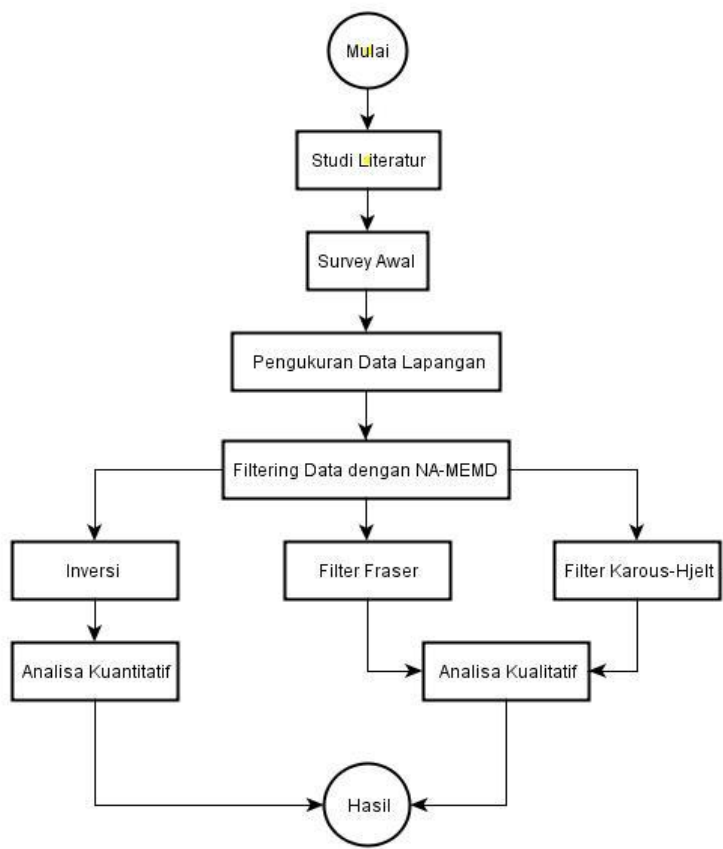
Peralatan dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu satu set VLF-EM, GPS, meteran, kompas geologi, software matlab 2009, software Surfer dan software In2DVLF.



Gambar 3.1 Peralatan yang digunakan saat pengukuran (a) dan (b) satu set VLF-EM, (c) GPS, (d) Meteran, (e) Kompas Geologi

3.2 Prosedur Kerja

Pada penelitian tentang studi pemetaan permukaan bawah tanah untuk mengetahui aliran sungai bawah tanah di Rengel–Tuban dengan menggunakan metode Geofisika *Very Low Frequency–Electromagnetic (VLF-EM)*, dengan diagram alir seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

Secara detail, pada Gambar 3.2 dapat dideskripsikan seperti berikut:

1. Studi Literatur

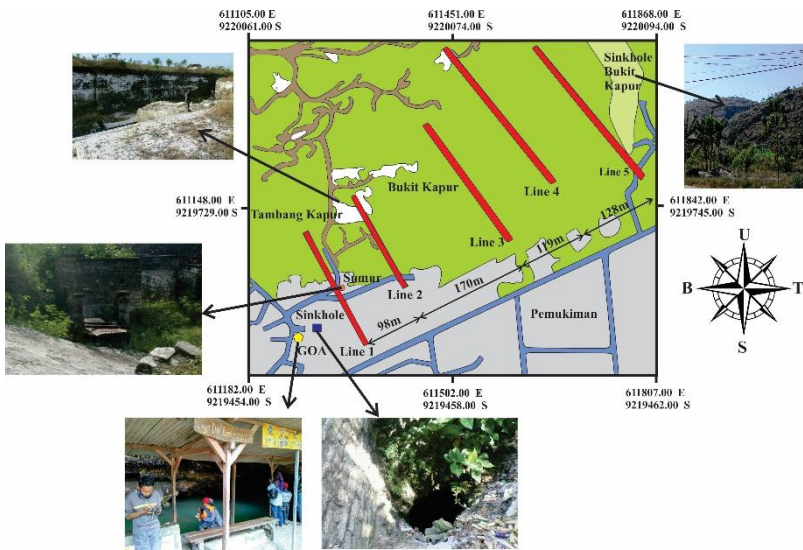
Studi literatur merupakan tahapan pertama untuk melakukan penelitian ini yaitu dengan mengumpulkan literature-literatur yang berhubungan dengan sungai bawah tanah dan penelitian yang mengenai *Very Low Frequency–Electromagnetic (VLF-EM)*. Dalam mengumpulkan literatur yang sesuai dengan materi penelitian ini yaitu geologi regional Rengel-Tuban, karst, sungai bawah tanah, metode VLF-EM, teori dasar VLF-EM, hubungan amplitude medan magnet dan fase, noise, filter NA-MEMD, filter Karous-Hjelt, filter Fraser dan Inv2DVLF.

2. Survey Awal

Survey awal ini dilakukan untuk memperoleh gambaran dari kondisi geologi pada lokasi penelitian dan menentukan titik lokasi yang akan diukur dengan menggunakan alat sebagai berikut: peta geologi, kamera, GPS (*global position system*).

3. Pengukuran Data Lapangan

Pengukuran pada penelitian ini dilakukan di Rengel-Tuban. Dengan jumlah lintasan yang diukur sebanyak 5 lintasan yang panjang lintasan masing-masing adalah 200m, 225m, 255m, 300m, 300m dan 300m. Kemudian pada spasi titik pengukuran pada masing-masing lintasan adalah 2m, 3m, 3m, 3m, dan 3m. Dengan penggunaan spasi yang disebutkan ini bertujuan untuk mendapatkan minimal 70 data pada satu lintasan sehingga dapat mempermudah interpretasi pada hasil penelitian. Dimana untuk spasi antar lintasan minimal 98m seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.3 Desain Akuisisi Data VLF-EM

4. Filter Data Dengan NA-MEMD

Tujuan dilakukannya filter dengan NA-MEMD digunakan untuk mengatasi permasalahan dari penyimpangan nilai pengukuran yang diakibatkan dari noise yang mempengaruhi sinyal VLF-EM. Selain itu, filtering ini bertujuan untuk mendekomposisikan (memisahkan sinyal berdasarkan titik optimumnya) data VLF-EM secara adaptive. Proses filtrasi ini, menggunakan aplikasi Matlab R20091 dengan algoritma NA-MEMD yang diciptakan oleh Rehman dan Mandic (2011).

5. Analisa Kualitatif

Analisa secara kualitatif dilakukan dengan menggunakan Filtering, salah satu contohnya adalah filter Fraser dan filter Karous-Hjelt (Rochman dkk, 2014). Filter Fraser didesain untuk melemahkan panjang gelombang yang terlalu besar dalam

mengurangi efek topografi dan diaplikasikan pada data *tilt-angle*. Dimana *tilt-angle* ini, merupakan hasil dari polarisasi elipstik medan magnetik bawah permukaan. Sehingga prinsip dari filter Fraser yaitu dengan mengubah crossover dari data tripper yang akan menjadi respon puncak pada polarisasi magnetik ellips yang berada di sepanjang lintasan survey (Purwanto dkk, 2015).

Filter K-Hjelt merupakan suatu filter yang dikembangkan dengan desain medan magnetik yang berhubungan dengan aliran arus listrik (Purwanto dkk, 2015). Pada filter tersebut menggunakan teori linear untuk menyelesaikan permasalahan integral atas distribusi arus. Sehingga filter ini, menghasilkan variasi rapat arus di setiap kedalaman yang diturunkan dari komponen vertikal medan magnetik di setiap titik pengukuran (Zikri, 2013).

6. Analisa Kuantitatif

Untuk memperoleh lapisan bawah permukaan secara kuantitatif pada umumnya dilakukan melalui pemodelan. Hal ini, dilakukan dengan bertujuan dapat disederhankan dan respon model dapat diperkirakan secara teoritis dengan memanfaatkan teori-teori fisika (Grandis, 2009). Analisa kuantitatif ini dilakukan dengan pemodelan ke belakang (*inverse modeling*). Pada pemodelan ke belakang (*inverse modeling*) untuk data VLF-EM ini menggunakan perangkat lunak yaitu Inv2DVLF. Perangkat lunak tersebut digunakan untuk menggambarkan secara kuantitatif menggunakan frekuensi tunggal pada data VLF-EM, serta menggunakan metode regulasi dalam proses inverting data inphase dan quadratur. Keluaran yang dihasilkan dari inversi ini berupa model resistifitas 2-D struktur bawah permukaan dari respon data lapangan yang diperoleh dan nilai error data yang terendah.

“ halaman ini sengaja dikosongkan ”

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini mendeskripsikan tentang analisis dan pembahasan hasil penelitian untuk menyelesaikan permasalahan yang telah didefinisikan sebelumnya. Dari data penelitian yang diperoleh untuk analisa pemetaan aliran sungai bawah tanah di daerah Rengel-Tuban dengan menggunakan metode *Very Low Frequency-Electromagnetic* (VLF-EM).

4.1 Pengukuran Data VLF-EM

Pengukuran data lapangan pada penelitian ini dilakukan pada 5–8 September 2016 di daerah Rengel-Tuban dengan menggunakan metode *Very Low Frequency-Electromagnetic* (VLF-EM). Dengan parameter pengukuran data VLF-EM disusun seperti Tabel 4.1 dan desain pengukuran dapat dilihat pada Gambar 3.3.

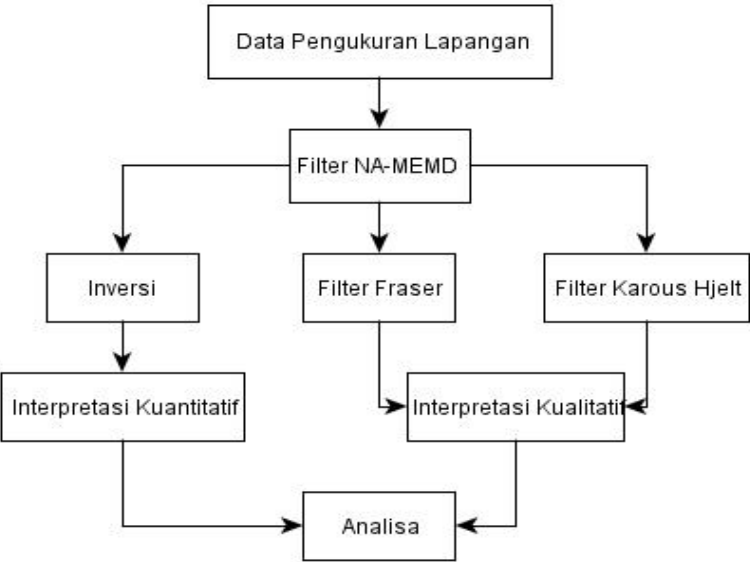
Tabel 4. 1 Parameter pengukuran data VLF-EM

No	Parameter	Nilai Parameter
1	Jumlah lintasan	5
2	Panjang lintasan	
	Lintasan 1	200m
	Lintasan 2	225m
	Lintasan 3	255m
	Lintasan 4-5	300m
3	Spasi titik pengukuran	
	Lintasan 1	2m
	Lintasan 2–5	3m
4	Jumlah titik pengukuran	
	Lintasan 1	101 titik
	Lintasan 2	76 titik
	Lintasan 3	86 titik
	Lintasan 4	101 titik

	Lintasan 5	101 titik
5	Frekuensi pengukuran	
	Lintasan 1	21900 Hz
	Lintasan 2	23700 Hz
	Lintasan 3	22800 Hz
	Lintasan 4	17700 Hz
	Lintasan 5	15900 Hz
6	Data terukur	Inphase, dan quadrature,

4.2 Pengolahan Data

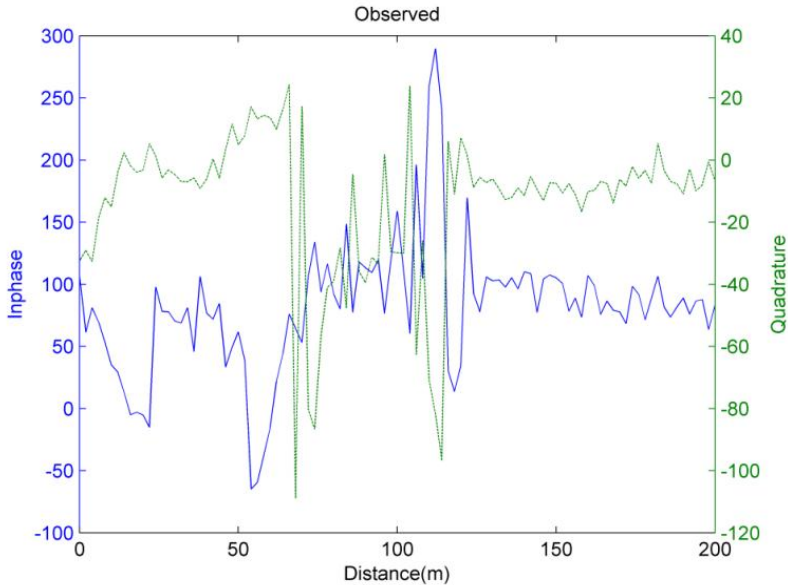
Pengelolaan data pada penelitian ini dilakukan di daerah Rengel-Tuban dengan menggunakan metode *Very Low Frequency-Electromagnetic* (VLF-EM) dibagi menjadi 2, yakni analisa kualitatif dan kuantitatif, sebagaimana pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram alir pengolahan data VLF-EM

4.2.1 Data Pengukuran Lapangan

Hasil pengukuran data lapangan dapat ditampilkan dengan cara menggambarkan inphase dan quadrature terhadap jarak di setiap titik pengambilan data pada lintasan (Gambar 4.2).



Gambar 4.2 Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 1

Gambar 4.2 terlihat bahwa data pengukuran mengandung noise yang ditunjukkan oleh besarnya nilai inphase dan quadrature yang keluar dari range nilai -100-0 (%) atau 0-100 (%).

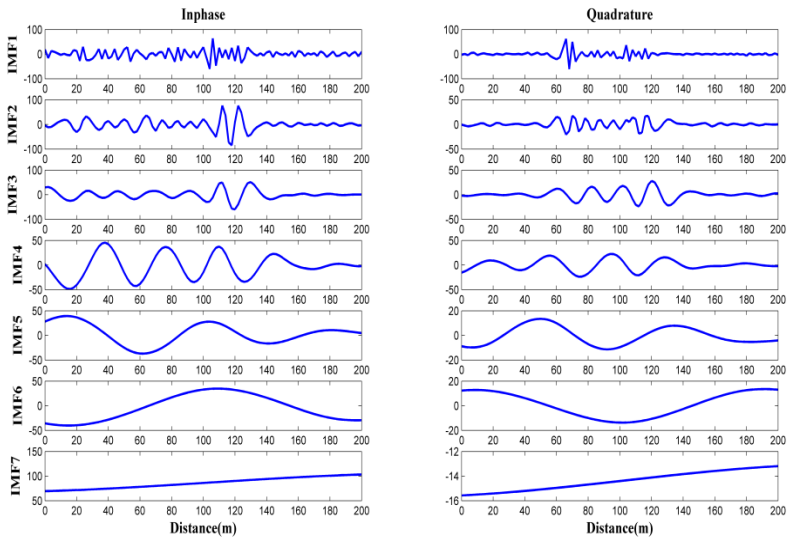
Noise yang mengganggu pengukuran ini kemungkinan berupa pengaruh dari radiasi medan magnetik yang diakibatkan dari petir di atmosfer yang berada di tempat dekat atau jauh dari lokasi pengukuran sehingga menyebabkan melemahkan sinyal yang dipancarkan oleh pemancar (Fariz, 2008; Wijaya, 2014). Selain itu, kemungkinan juga disebabkan oleh kondisi lingkungan di titik pengambilan data, yang terdapat pada wilayah pemukiman penduduk. Dengan kondisi lingkungan tersebut, kemungkinan

noise yang bersumber dari gelombang elektromagnetik lain (selain gelombang primer VLF-EM), yakni: gelombang radio, *hand phone*, televisi, dan kabel listrik. Oleh karena itu, data pengukuran memiliki amplitud yang lebih besar dari amplitud secara teori, yakni keluar dari range $[-100\%, 100\%]$. Karena pergeseran fase antara komponen medan elektromagnetik primer dan sekunder memiliki pengaruh untuk menentukan nilai konduktivitas dari suatu konduktor yang berada di bawah permukaan. Dengan demikian, dibutuhkan proses lebih lanjut untuk memisahkan noise pada data pengukuran yaitu dengan dilakukannya filter data.

4.2.2 Filter NA-MEMD

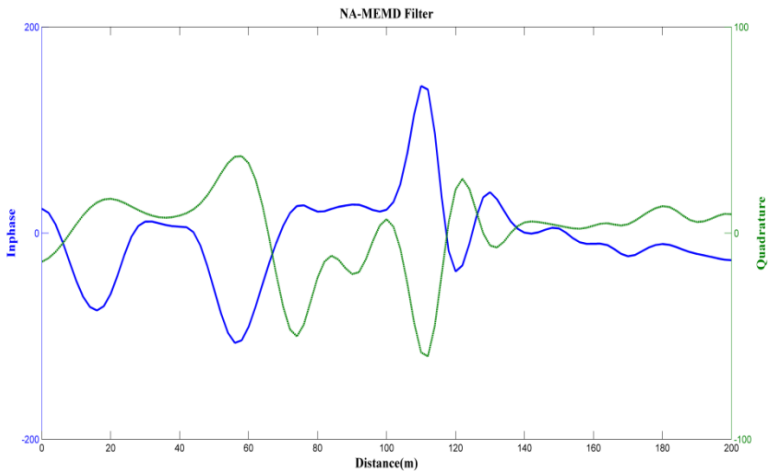
Filter NA-MEMD diaplikasikan untuk memisahkan noise pada data VLF-EM secara simultan (pada data inphase dan quadrature). Pada proses ini digunakan tambahan dua variate *Gaussian* noise dengan standard deviasi 0.03 dari masing-masing data inphase dan quadrature, sebagaimana yang di rekomendasikan Sungkono dkk (2016).

NA-MEMD digunakan untuk mendekomposisikan (memisahkan sinyal berdasarkan titik optimumnya) data VLF-EM secara adaptive. Sebagai contoh, data lintasan 1 (Gambar 4.2) didekomposisi menggunakan algoritma NA-MEMD sehingga menghasilkan beberapa *intrinsic mode function* (IMF), sebagaimana pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Pemisahan noise dan nilai residu terhadap data pengukuran pada lintasan 1

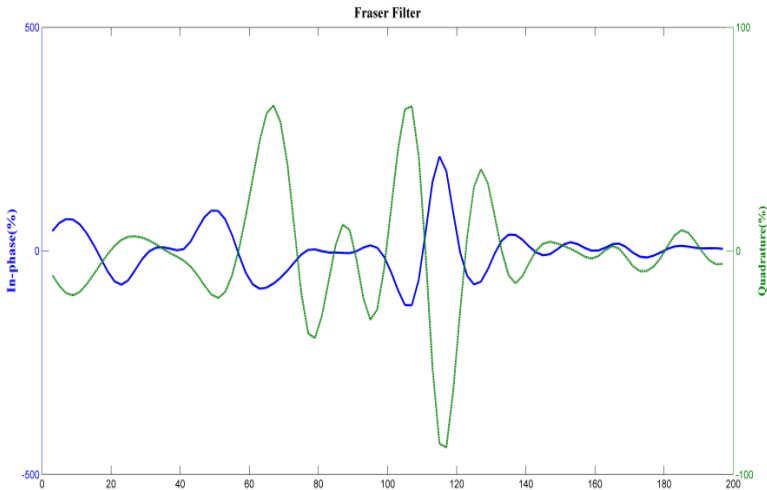
Gambar 4.3 menunjukkan bahwa IMF 1 dan IMF 2 memiliki bilangan gelombang yang tinggi. Yang umumnya mencerminkan noise geologi atau geologi dekat dengan permukaan. IMF terakhir atau biasa disebut sebagai trend atau residu merupakan representasi dari geologi yang dalam ataupun *background noise*. IMF terakhir ini tidak memotong titik nol, sehingga IMF ini tidak merepresentasikan anomali target (Jeng dkk, 2007). Selain itu, Sungkono dkk (2016) menunjukkan bahwa untuk proses inversi data VLF-EM, membuang IMF terakhir ini sangatlah menguntungkan agar resistivitas bawah permukaan yang dihasilkan sesuai dengan kondisi geologi yang sebenarnya. Oleh karena itu, IMF1, IMF2 dan IMF terakhir tidak diikutkan penjumlahan dalam merekonstruksi atau memfilter data VLF-EM. Dengan demikian, dihasilkan data VLF-EM terfilter yang dapat dilihat sebagaimana pada Gambar 4.4



Gambar 4.4 Plot data pengukuran dengan filter NA-MEMD pada lintasan 1

4.2.3 Filter Fraser

Berdasarkan dari prinsip yang dimiliki filter Fraser yaitu dengan mengubah crossover dari data tripper yang akan menjadi respon puncak pada polarisasi magnetik ellips yang berada di sepanjang lintasan survey. Filter tersebut menghitung gradien horisontal data sehingga menghasilkan nilai maksimum di atas konduktor yang dapat di konturkan (Zikri, 2013). Berdasarkan Persamaan (2.20), filter Fraser menggunakan 4 buah titik yang berurutan, dengan cara mengurangi jumlah dari nilai data ke-3 dan ke-4 terhadap jumlah dari nilai data ke-1 dan ke-2. Setelah itu, digambarkan di titik tengah antara data ke-2 dan ke-3 (Khalil dan Santos, 2010).

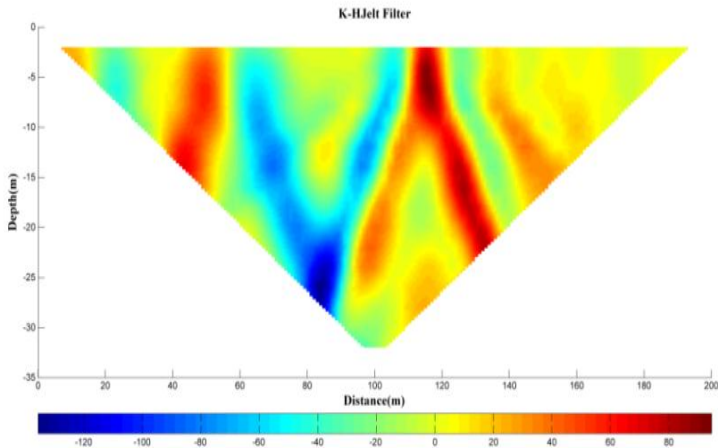


Gambar 4.5 Hasil filter Fraser pada lintasan 1

Gambar 4.5 merupakan hasil filter Fraser pada lintasan 1. Filter ini secara prinsip akan berguna untuk mereduksi trend atau data dengan bilangan gelombang yang rendah maupun mengurangi efek topografi. Hasil persilangan inphase dan quadrature akan dirubah menjadi titik optimum, yakni: pada inphase dirubah menjadi nilai maksimum sedangkan pada quadrature dirubah menjadi nilai minimum. Sehingga nilai optimum ini dapat dipakai untuk menduga sebagai posisi konduktor yang menyebabkan anomali.

4.2.4 Filter Karous-Hjelt

Hasil filter K-Hjelt merupakan rapat arus relatif sebagai fungsi kedalaman semu (bukan kedalaman yang sebenarnya). Disebut sebagai kedalaman semu karena hasil kedalaman ini tergantung dengan besarnya spasi pengukuran. Filter ini dihitung menggunakan Persamaan (2.21).



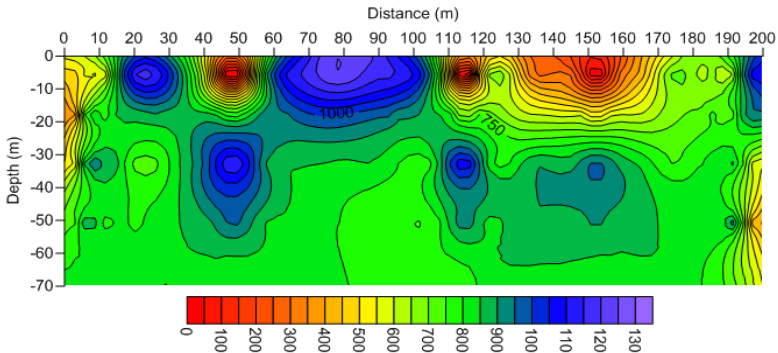
Gambar 4.6 Hasil filter K-Hjelt pada lintasan 1

Gambar 4.6 merupakan hasil filter K-Hjelt yang memperlihatkan bahwa nilai rapat arus sebagai fungsi kedalaman dan jarak pengukuran. Nilai rapat arus yang lebih besar yang ditandai dengan warna orange menunjukkan bahwa daerah tersebut terdapat anomali yang diakibatkan oleh benda konduktif. Sedangkan pada daerah yang memiliki nilai rapat arus yang lebih kecil yang ditandai dengan warna biru yaitu menunjukkan bahwa daerah tersebut terdapat anomali yang diakibatkan oleh benda resesif. Namun filter K-Hjelt tidak dapat menentukan letak kedalaman anomali yang sebenarnya. Sehingga filter K-Hjelt hanya mengidentifikasi *psudosection* anomali densitas arus pada lokasi horizontal dengan variasi rapat arus pada kedalaman yang sama antar titik pengukuran.

4.2.5 Inversi

Inversi data VLF-EM menggunakan program Inv2DVLF yang berbasis algoritma *finite element*. Algoritma tersebut digunakan untuk menyederhanakan suatu masalah secara numerik dengan hasil yang mendekati hasil analitik. Data yang digunakan

pada proses inversi ialah data VLF-EM terfilter dengan NA-MEMD. Dalam proses inversi ini digunakan iterasi 100 kali dengan parameter damping sebesar 0,3. Setelah dilakukan proses inversi, kemudian dilakukan pemodelan 2D lapisan bawah permukaan dengan menggunakan software Surfer. Hasil model inversi lintasan sebagaimana pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 1

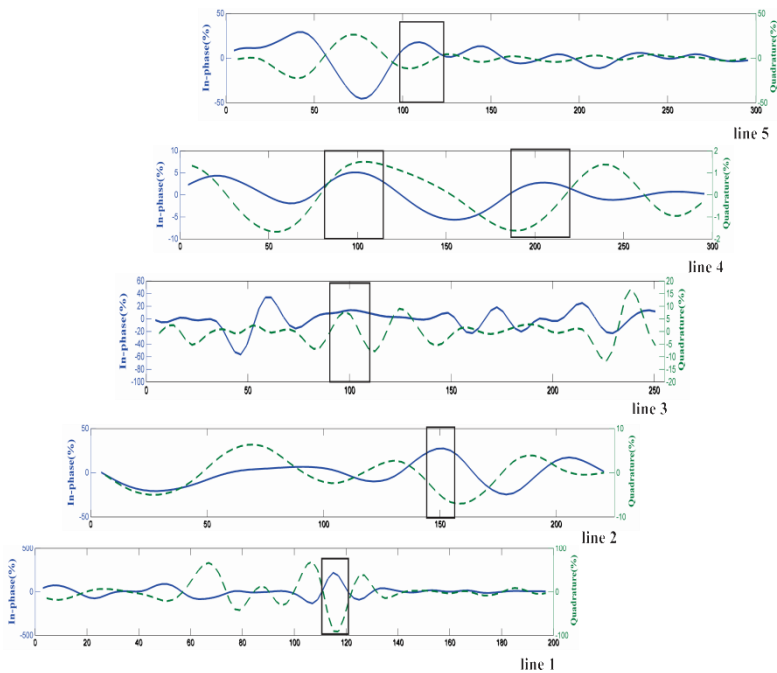
Hasil dari program Inv2DVLF berupa model 2D resistivitas bawah permukaan. Model tersebut menunjukkan persebaran nilai resistivitas bawah permukaan yang berkisar antara 0–1300 Ωm . Pada daerah yang memiliki nilai resistivitas yang lebih kecil yang ditandai dengan warna orange yaitu menunjukkan bahwa daerah tersebut terdapat anomali yang diakibatkan oleh benda konduktif. Sedangkan pada daerah yang memiliki nilai resistivitas yang lebih besar yang ditandai dengan warna biru yaitu menunjukkan bahwa daerah tersebut terdapat anomali yang diakibatkan oleh benda resesif.

4.3 Analisa dan Interpretasi Data

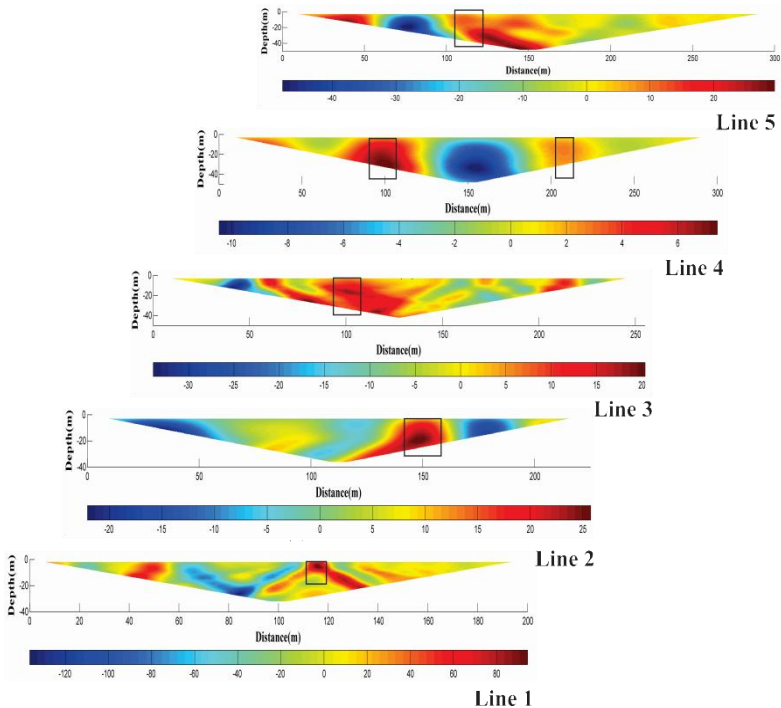
Interpretasi data VLF-EM dilakukan melalui analisa dari hasil filter Fraser dan K-HJelt, serta hasil inversi data terfilter NA-MEMD. Sebab antara filter Fraser dan K-HJelt seringkali mengindikasikan hal yang sama, yakni posisi anomali secara

lateral, maka dalam interpretasi ini, hasil analisa Fraser dan K-HJelt akan digunakan untuk mendukung interpretasi dari proses inversi.

Pada filter Fraser dapat menglokalisir sungai bawah tanah dengan ditunjukkannya dari nilai optimum untuk menduga posisi konduktor yang menyebabkan anomali. Sedangkan Filter K-HJelt dapat mengalokalisir sungai bawah tanah dengan baik yang ditunjukkan dengan nilai rapat arus relative yang maksimum (Sungkono dkk, 2016). Berdasarkan hasil ini, filter Fraser dan filter K-HJelt akan digunakan untuk memprediksi alur sungai bawah tanah di daerah Rengel, Tuban. Hasil interpretasi kualitatif jalur sungai pada daerah ini digambarkan sebagaimana pada Gambar 4.8 dan 4.9.



Gambar 4. 8 Hasil filter dengan Fraser pada tiap lintasan

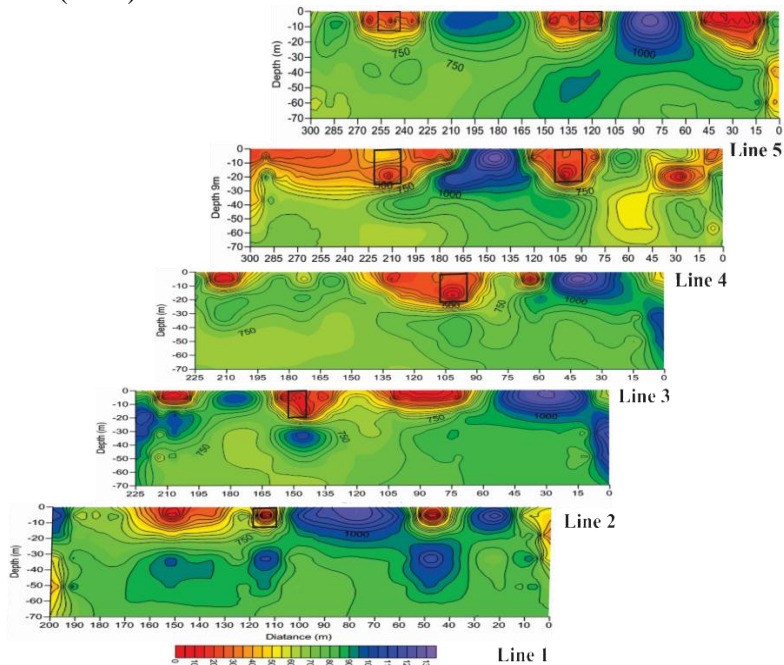


Gambar 4. 9 Hasil filter dengan K-Hjelt pada tiap lintasan

Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 memperlihatkan jalur sungai bawah tanah yang teridentifikasi dari titik optimumnya. Sehingga jalur sungai bawah permukaan tiap-tiap lintasan yang teridentifikasi sebagai berikut: lintasan pertama terlihat bahwa letak anomali di jarak 110-120m, lintasan kedua di jarak 145-155m, lintasan ketiga di jarak 95-105m, lintasan keempat di jarak 90-105m dan jarak 205-220m, dan di lintasan kelima terlihat pada jarak 120-135m.

Selanjutnya, dilakukan interpretasi secara kuantitatif melalui hasil proses inversi data VLF-EM untuk mengestimasi kedalaman sungai bawah tanah. Kedalaman sungai bawah tanah pada tiap lintasannya dapat dideskripsikan sebagaimana pada

Gambar 4.10 yang memperlihatkan nilai resistivitas 2D bawah permukaan pada tiap lintasan. Daerah penelitian ini merupakan kawasan karst yang memiliki resistivitas rata-rata sebesar $800\Omega\text{m}$. Karena sungai bawah tanah merupakan rongga (*void*) yang terisi oleh air, maka sungai bawah tanah memiliki nilai resistivitas yang lebih rendah dari pada nilai resistivitas lingkungan. Hal ini didukung dengan hasil pemodelan yang dilakukan oleh Sungkono dkk (2016).



Gambar 4.10 Hasil inversi 2D bawah permukaan pada tiap lintasan

Pada lintasan pertama terlihat letak anomali dijarak 110-120m pada kedalaman 5-10m dengan resistivitas sekitar $0-300\Omega\text{m}$. Lintasan pertama diwilayah pemukiman sehingga rentan sekali dengan noise. Hal ini terlihat pada jarak 40-50m dan 130-170m yang dipengaruhi noise dari kabel listrik. Sedangkan pada jarak 155-170m, titik pengambilan data pengukuran tepat

ditengah-tengah rumah warga. Sehingga pada jarak 40-50m, 130-170m dan 155-170m diduga bukan sebagai anomali sungai bawah permukaan.

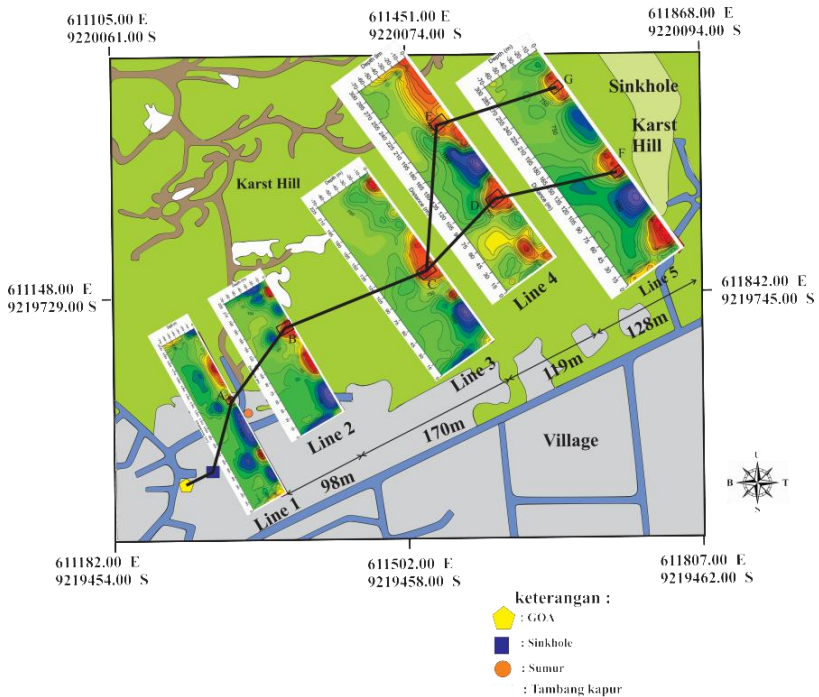
Lintasan kedua terlihat letak anomali dijarak 145-155m pada kedalaman 5-20m dengan resistivitas sekitar 0-300 Ω m. Kondisi lingkungan di lintasan kedua yaitu: di jarak 0-30m merupakan pemukiman penduduk, pada jarak 30-110m berada di ladang jagung, pada jarak 135-225m berada di perbukitan karst. Berdasarkan dari kondisi lingkungan tersebut, terlihat bahwa terdapat pengaruh noise pada jarak 93-117m yang dikelilingi bekas tambang, kemudian pada jarak 144-186m dan 204-225m berada di wilayah bekas tambang kapur tradisional. Sehingga pada jarak 0-30m, 93-117m, 144-186m, dan 204-225m bukan sebagai anomali sungai bawah tanah.

Lintasan ketiga terlihat letak anomali dijarak 95-105m pada kedalaman 10-20m dengan resistivitas sekitar 0-300 Ω m. Kondisi lingkungan di lintasan kedua yaitu: pada jarak 0-30m di wilayah hutan jati dan berada di perbukitan karst pada jarak 50-255m. Namun pada jarak 60-70m cekungan bukit. Lalu pada jarak 110-135m berada di tengah perbukitan. Dan pada jarak 240-255m berada di atas bekas tambang kapur tradisional, hal ini terdapat noise karena diduga pada bekas tambang terdapat air yang terjebak. Sehingga pada jarak 60-70m, 110-135m, 240-255m bukan objek anomali sungai bawah tanah.

Lintasan keempat terlihat letak anomali di jarak 90m-105m dan 205-220m pada kedalaman 10-20m dengan memiliki resistivitas sekitar 0-300 Ω m. Pada lintasan 4 ini menaiki perbukitan karst. Namun pada jarak 0-45m berada di perkebunan pohon jati. Kemudian pada 225-261m berada di cekungan bukit, dengan kondisi tanah yang lebih subur dibandingkan daerah yang lain sehingga pada daerah ini memiliki resistivitas yang lebih rendah. Setelah itu, di jarak 261-282m berada di wilayah bekas tambang kapur tradisional. Sehingga pada jarak 0-45m, 225-261m, 261-282m bukan objek anomali sungai bawah tanah.

Pada lintasan terakhir (kelima) terlihat letak anomali dijarak 120-135m dan 250-260m pada kedalaman 5-10m dengan resistivitas sekitar 0-300 Ω m. Pada lintasan 5 berada di wilayah pemukiman pada jarak 15-45m, dan perbukitan karst di jarak 60-300m. Namun di jarak 15-45m, 130-150m, dan 230-250m bukan objek anomali. Hal ini karena pada jarak 15-45m memiliki pengaruh noise berupa kabel listrik, kemudian pada jarak 130-150m berada di sekitar tebing sehingga efek topografi dapat mempengaruhi data pengukuran. Kemudian pada jarak 230-250m berada di atas perbukitan karst.

Dengan demikian, jalur sungai bawah permukaan dapat dideskripsikan sebagaimana pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Aliran sungai bawah tanah di daerah Rengel-Tuban

Gambar 4.11 memperlihatkan jalur aliran sungai bawah permukaan. Pada daerah penelitian ini terlihat kemungkinan terdapat sungai bawah permukaan yang ditandai dengan adanya goa, *sinkhole*, sumur galian yang menembus ke goa. Dari hal tersebut untuk lintasan pertama diambil diantara goa, *sinkhole*, dengan sumur galian yang menembus ke goa, sehingga teridentifikasi objek anomali sungai bawah permukaan berada dijarak 100-110m. Sedangkan pada lintasan kedua teridentifikasi objek anomali pada jarak 145-155m. Sedangkan lintasan ketiga teridentifikasi objek anomali di jarak 95-105m. Lalu dilintasan keempat teridentifikasi objek anomali sungai bawah permukaan pada jarak dijarak 90-105m dan 205-220m. Dan dilintasan kelima teridentifikasi objek anomali sungai bawah permukaan pada jarak 120-135m dan 250-260m. Berdasarkan dari letak objek anomali pada tiap-tiap lintasan bahwa jalur aliran sungai bawah permukaan diduga berasal dari sinkhole bukit karst sehingga arah alirannya sungai bawah permukaan berarah dari utara menuju selatan.

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil pengolahan data dan interpretasi data VLF di daerah Rengel Tuban, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode VLF-EM dapat digunakan untuk mengidentifikasi sungai bawah tanah di daerah Rengel-Tuban dengan akurat, dan sesuai dengan keberadaan sinkhole (sebagai indikasi dari sungai bawah tanah) dan arah jalur aliran sungai bawah tanah mengarah dari utara menuju selatan.
2. Kedalaman sungai bawah tanah di daerah Rengel-Tuban berkisar di antara 5-20m.

5.2 Saran

Setelah dilakukannya penelitian ini maka diperoleh beberapa hal yang dapat disarankan untuk menjadi bahan perbandingan dalam penelitian yang akan lebih lanjut, di antara lain sebagai berikut:

1. Diperlukannya pengujian terhadap hasil interpretasi untuk daerah luar dari desain pengambilan data.
2. Diperlukannya analisa lebih lanjut terhadap hasil interpretasi untuk mengetahui arah dan aliran sungai bawah permukaan di daerah Rengel-Tuban.

“ halaman ini sengaja dikosongkan ”

DAFTAR PUSTAKA

- Adji, T dan Suyono. 2004. Bahan Ajar Hidrologi Dasar. Fakultas Geografi UGM.
- Adji, T.N, Mujib, M.A, Fatchurohman, H, Bahtia, I.Y. 2015. Analisis Tingkat Perkembangan Akuifer Karst di Kawasan Karst Gunung Sewu, Daerah Istimewa Yogyakarta dan Karst Rengel, Tuban, Jawa Timur Berdasarkan Analisis Hidrograf. Research Gate.
- Fariz, E. 2008. Penggunaan Filter Power Spectrum dan Weighted Moving Average Pada Data Very Low Frequency (VLF). Jurusan Fisika FMIPA ITS.
- Ford, D.C, Williams, P.W. 1989. Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman London.
- Ghufron, 2010. Estimasi Penyebaran Deposit Fosfat di Wilayah Perum Perhutani KPH Pati BKPH Sukolilo Pati dengan Metode Very Low Frequency Elektromagnetik Vertical Gradient (VLF-EM-VGRAD). Jur. Fis. FMIPA ITS.
- Grandis, H. 2009. Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI). Jakarta.
- Handayani, A., 2009. Analisis Potensi Sungai Bawah Tanah Di Gua Seropan Dan Gua Semuluh Untuk Pendataan Sumberdaya Air Kawasan Karst Di Kecamatan Semanu Kabupaten Gunung Kidul. Fakultas Keguruan Dan Ilmu Pendidik. Universitas Sebelas Maret Surakarta.
- Hartono, Suharsono, 1997. Peta Geologi Lembar Tuban, Jawa Timur. Bandung.
- Hidayatullah, W.M. 2016. Analisa Zona Rembesan Air Pada Tanggul Lumpur Sidoarjo (Lusi) Menggunakan Metode Self Potential Dengan Algoritma Very Fast Simulated Annealing. Jurusan Fisika FMIPA ITS.
- Indriyani, D.D. 2014. Tugas Akhir : Pemetaan Distribusi Aliran Sungai Bawah Tanah. Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang.

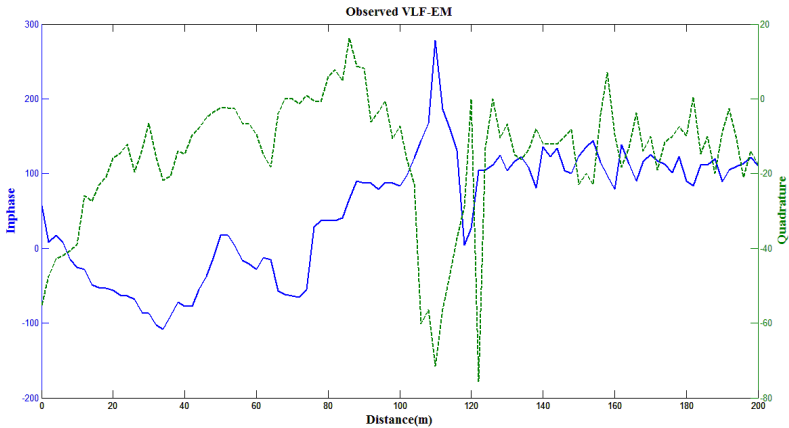
- Khalil, M., Santos, M., 2010. Comparative study between filtering and inversion of VLF-EM profile data. *Arab J Geosci* 4 309–317.
- Purwanto, E.H., Minarto, E., Bahri, A.S., 2015. Aplikasi Metode Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM) untuk Karakteristik Bawah Permukaan di Daerah Kapur Desa Melirang Kecamatan Bungah Kabupaten Gresik (Halaman 38 s.d. 41). *J. Fis. Indones.* 19.
- Rehman, N. ur, Mandic, D.P. 2011. Filter Bank Property of Multivariate Empirical Mode Decomposition. *IEEE Trans. Signal Process.* 59, 2421–2426.
- Rochman, J.P., Bahri, A.S., Hariyanto, teguh, Anjasmara, I.M., 2014. Aplikasi Metode Vlf-Em Untuk Memetakan Struktur Bawah Permukaan Tanah (Studi Kasus Lusi Porong Sidoarjo). *Pros. Seminar Nasional Sains Dan Pendidik. Sains IX Fakultas Sains Dan Matematika UKSW* 5.
- Rodi, W., Mackie, R. 2001. Nonlinier Conjugate Gradients Algoritm for 2-D Magnetotelluric Inversion. *Geophys.* 66 174–187.
- Santos, M.F. 2006. Mapping Groundwater Contamination Around A Landfill Facility Using The VLF-EM Method – A Case Study.
- Santoso, D. 2004. Eksplorasi Energi Geothermal. ITB, Bandung
- Sarmili, L., Hermansyah, G., Indrajaya, D., 2010. Pembentukan Undak Batugamping Dan Hubungannya Dengan Struktur Diapir Di Perairan Tanjung Awar-Awar Paciran Jawa Timur. *Geologi Kelautautan* 8, 3.
- Sasaki, Y., 2001. Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC. *J. Appl. Geophys.* 46, 45–54.
- Sungkono, Santosa, B.J., Bahri, A.S., Santos, F.M., Iswahyudi, A., 2016. Application Of Noise-Assisted 1 Multivariate Empirical Mode 2 Decomposition In Vlf-Em Data To Identify Underground River. *Worldscientific*.

- Sungkono, Husein, A., Prasetyo, H., Ayi S. Bahri, Fernando A. Monteiro Santos, Bagus J. Santosa, 2014. The VLF-EM imaging of potential collapse on the LUSI embankment. *J. Appl. Geophys.* 218–232.
- Supriyanto. 2007. *Analisa Data Geofisika : Memahami Teori Inversi Edisi I*. Jurusan Fisika FMIPA Universitas Indonesia
- Trudgil, S. 1985. *Limestone Geomorphology*. Longman N. Y. neering. University of New South Walws. Sydney, Australia
- Wijaya, Okok, 2014. Tugas Akhir : Identifikasi Patahan Bawah Permukaan Untuk Evaluasi Mud Vulcano Di Gunung Anyar Tengah-Surabaya Dengan Metode Very Low Frequency–Electromagnetic (Vlf – Em). Jurusan Fisisika FMIPA ITS.
- Wijaya, R.A.E., Karnawati, D., Srijono, Wilopo, W., 2015. *Desain Tambang Kuari Batugamping Berongga Di Blok Sawir Tuban Jawa Timur (Quarry Mine Design of Cavity Limestone in Sawir Block Tuban East Java)*. Promine 3.
- Wijayanto, T., Santosa, B.J., Warnana, D.D., Candra, A.D., n.d. *Penerapan Metode Very Low Frequency Electromagnet (VLF-EM) untuk Menafsirkan Bidang Longsoran, Studi Kasus Desa Jombok, Kecamatan Ngantang, Kabupaten Malang, Jawa Timur*. Spektra Jurusan Fisika Dan Aplikasi Vol 16 No 3 Desember 2015.
- Zikri, A., 2013. Tugas Akhir : Penggunaan Filter Robust Multifikatif Regulasi Pada Data Very Low Frequency Elektromagnetik (VLF-EM). Jurusan Fisika FMIPA ITS.

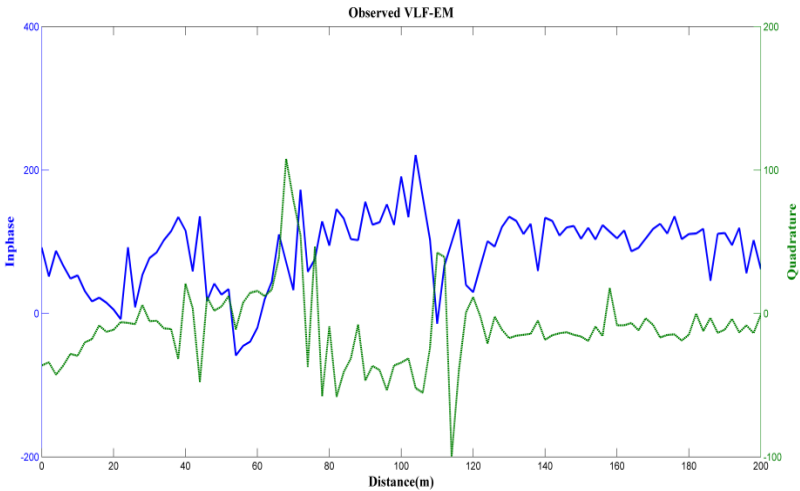
“ halaman ini sengaja dikosongkan ”

LAMPIRAN 1

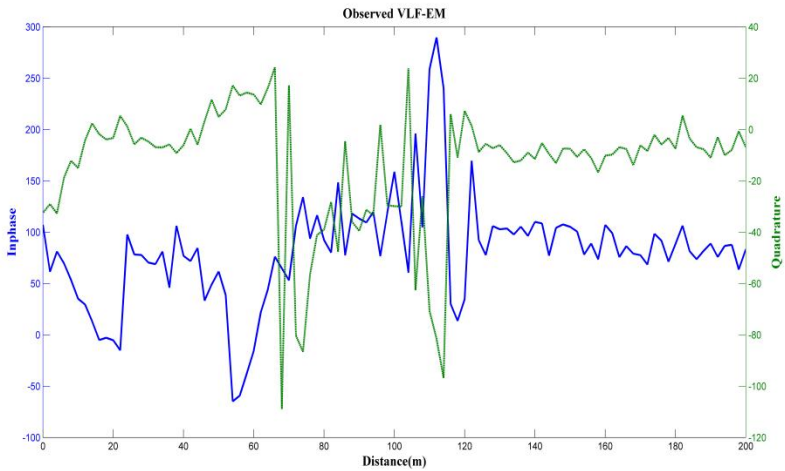
Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter



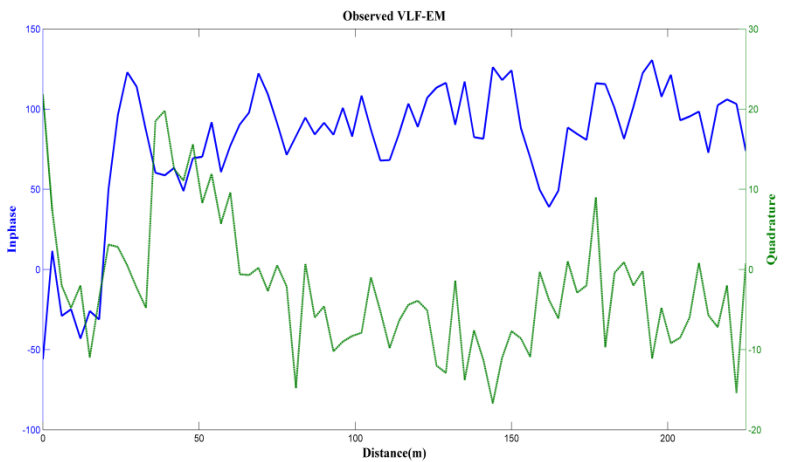
Gambar 1. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 1 dengan frekuensi 23,7Khz



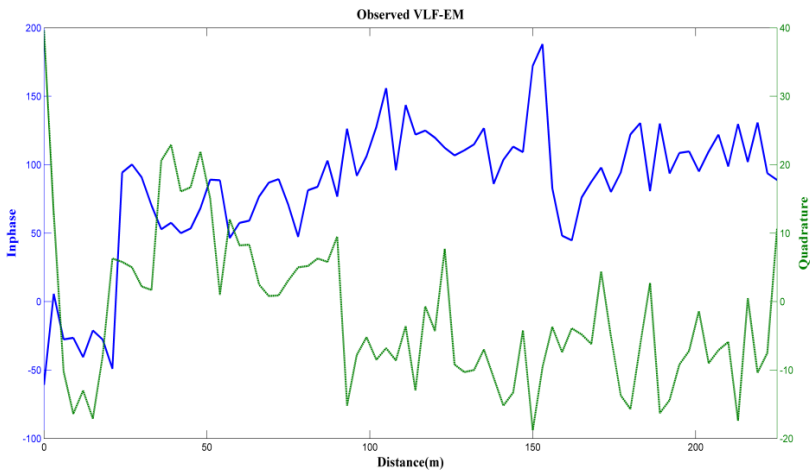
Gambar 2. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 1 dengan frekuensi 21.9 KHz



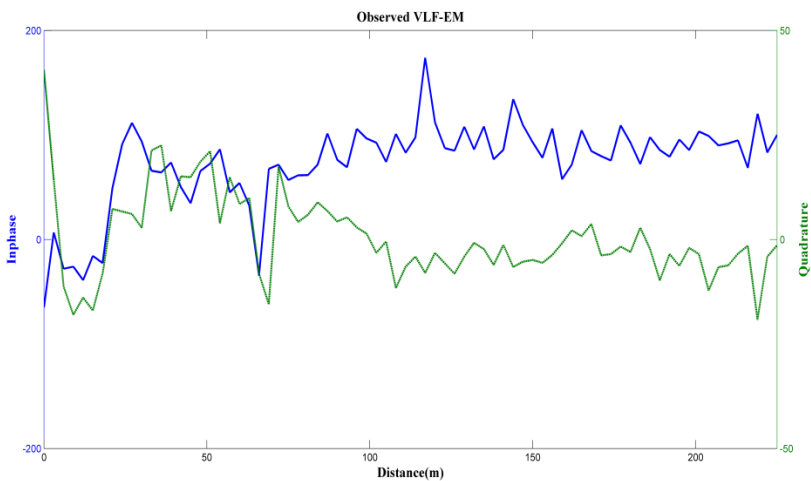
Gambar 3. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 2 dengan frekuensi 23,7 KHz



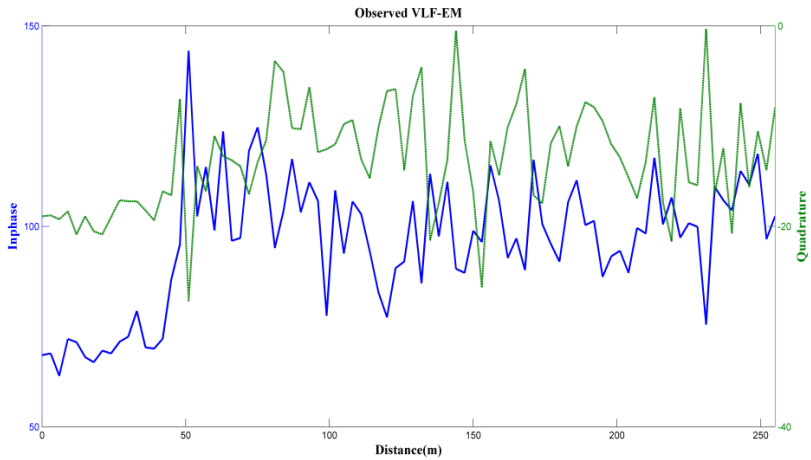
Gambar 4. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 2 dengan frekuensi 22 KHz



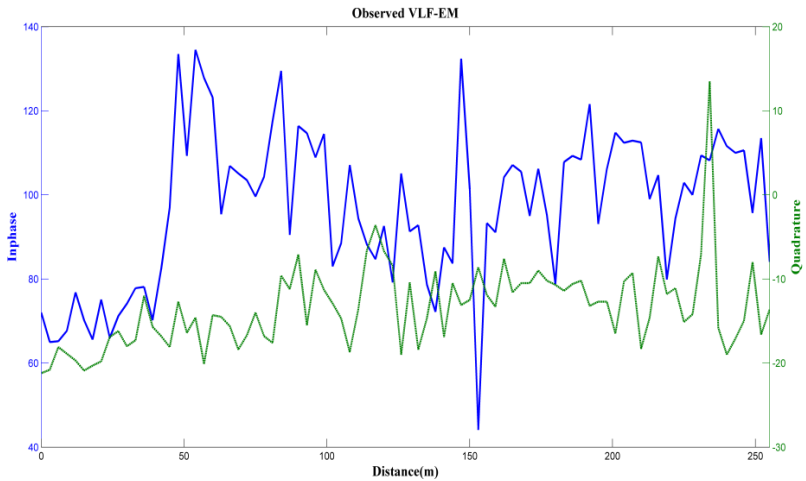
Gambar 5. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 2 dengan frekuensi 21.9 KHz



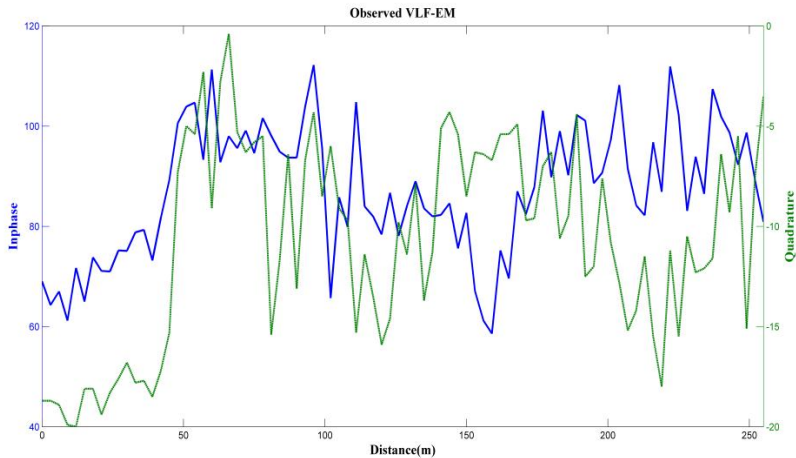
Gambar 6. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 3 dengan frekuensi 22 KHz



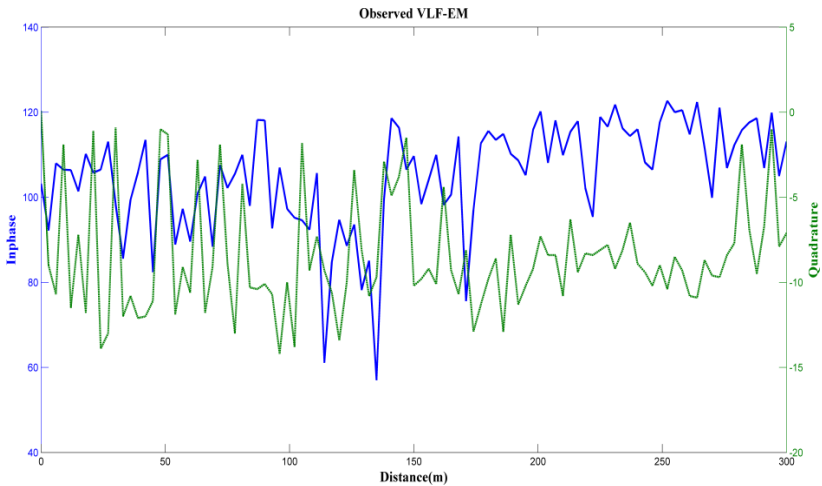
Gambar 7. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 3 dengan frekuensi 22.Khz



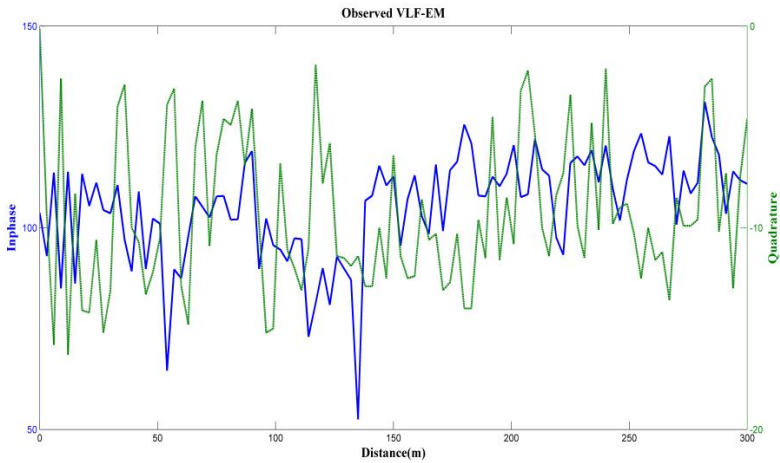
Gambar 8. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 3 dengan frekuensi 22.8 KHz



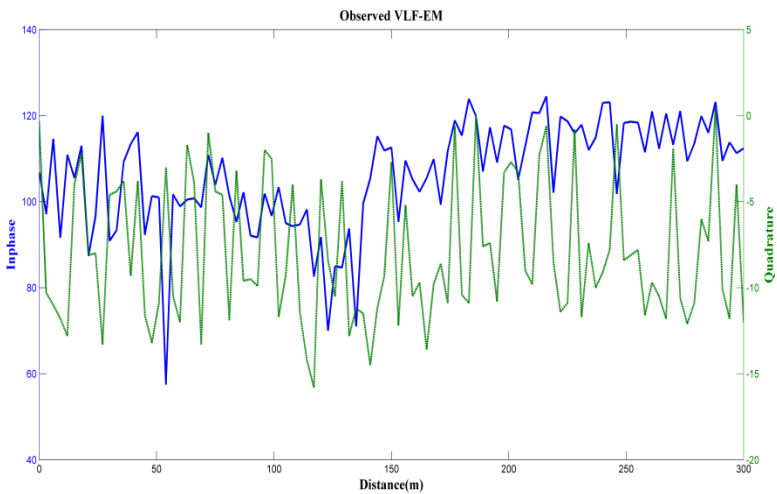
Gambar 9. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 4 dengan frekuensi 21.7 KHz



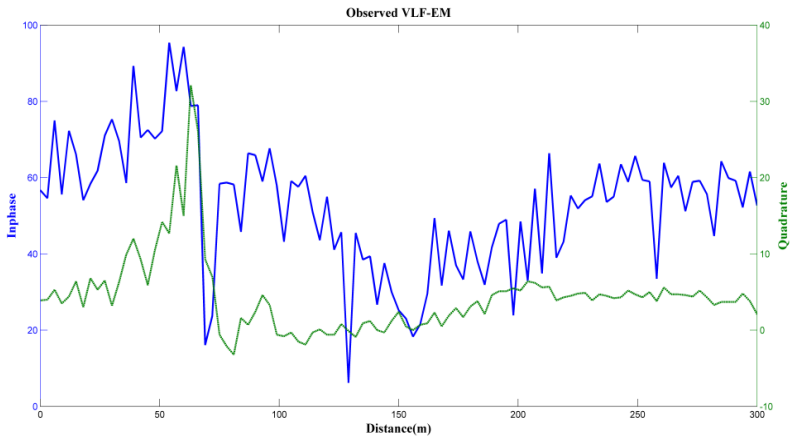
Gambar 10. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 4 dengan frekuensi 15.7 KHz



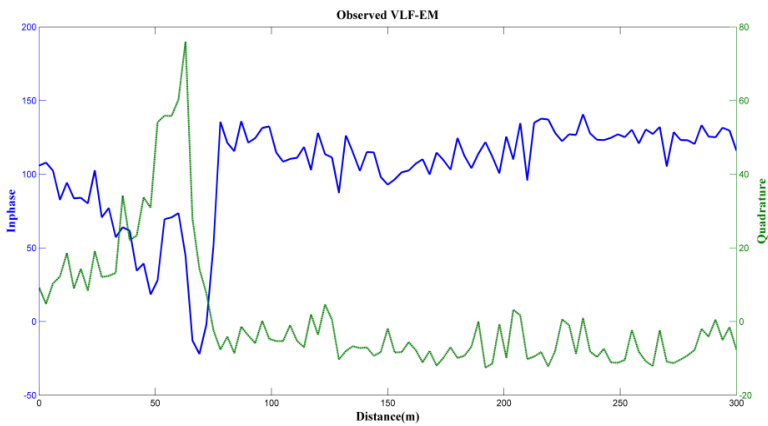
Gambar 11. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 4 dengan frekuensi 17.7 KHz



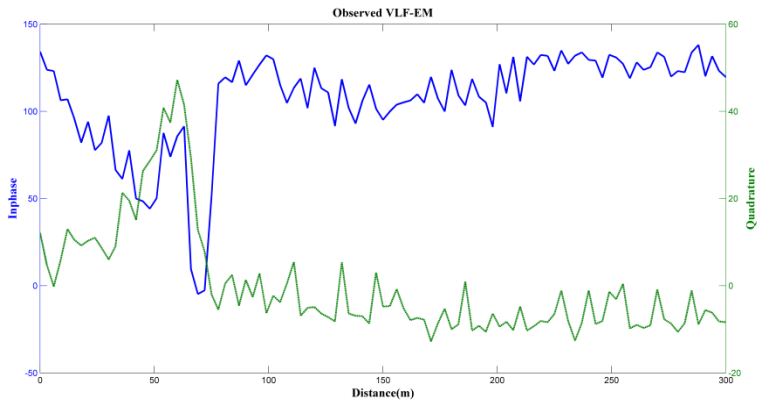
Gambar 12. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 4 dengan frekuensi 15.8 KHz



Gambar 13. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 5 dengan frekuensi 19.2 KHz



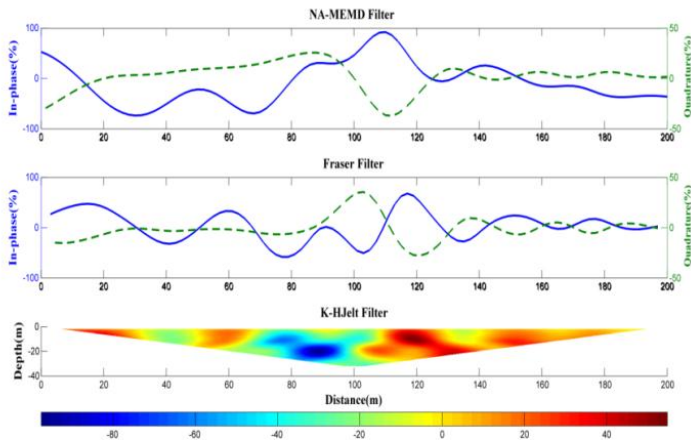
Gambar 14. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 5 dengan frekuensi 15.9 KHz



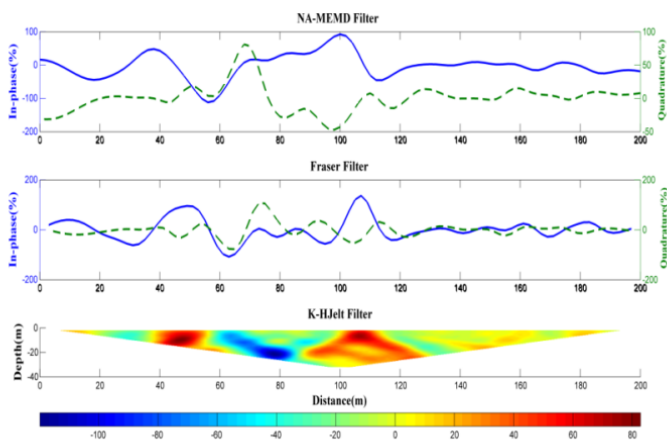
Gambar 15. Plot data pengukuran VLF-EM tanpa filter pada lintasan 5 dengan frekuensi 15.2 Khz

LAMPIRAN 2

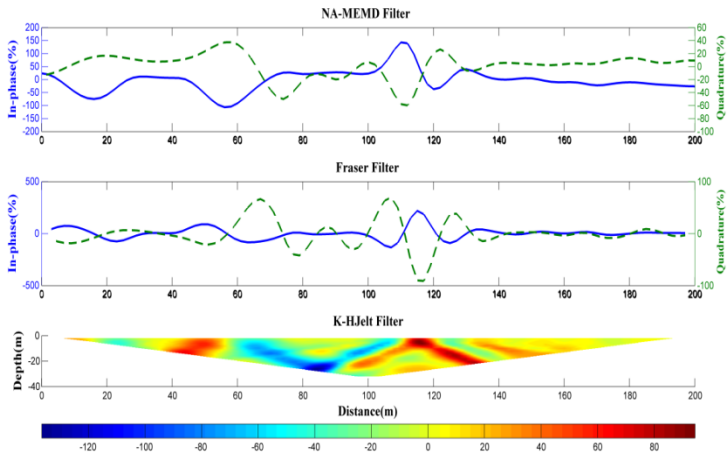
Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt



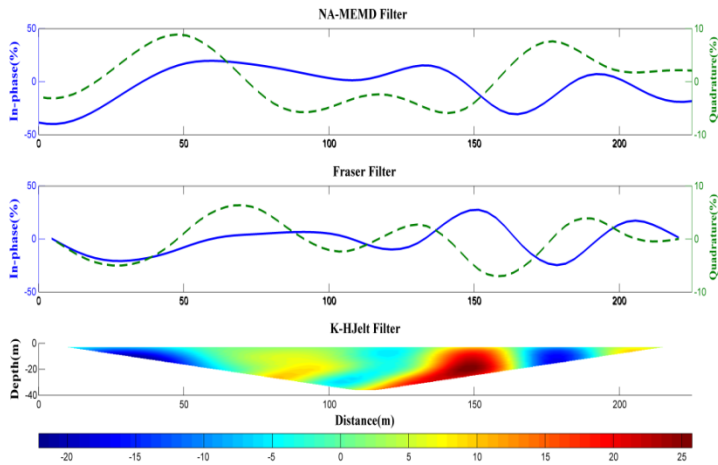
Gambar 16. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 1 dengan frekuensi 23.7Khz



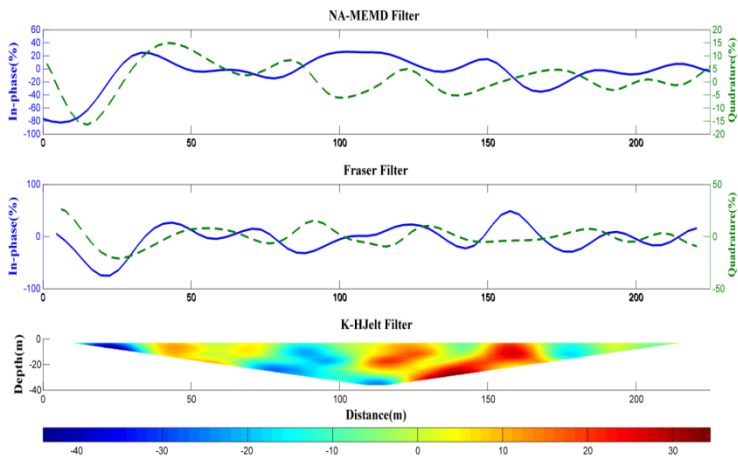
Gambar 17. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 1 dengan frekuensi 22 KHz



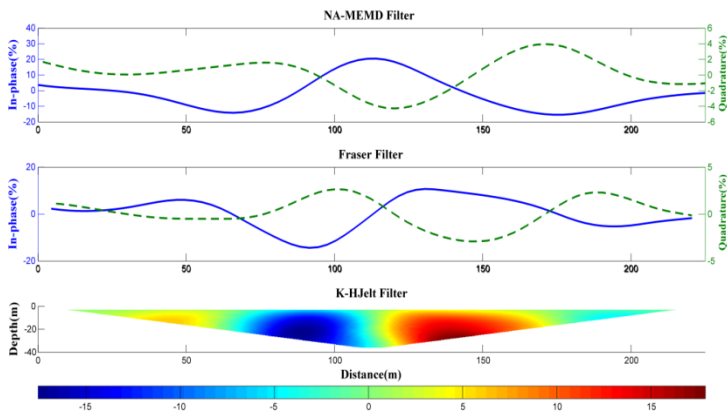
Gambar 18. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 1 dengan frekuensi 21.9 Khz



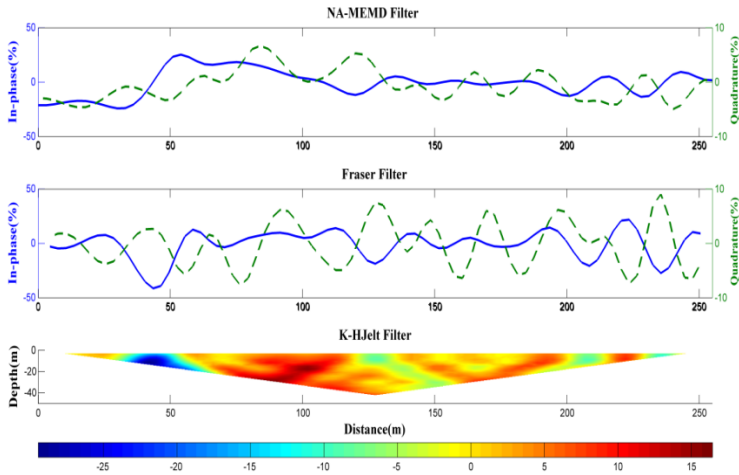
Gambar 19. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 2 dengan frekuensi 23.7 Khz



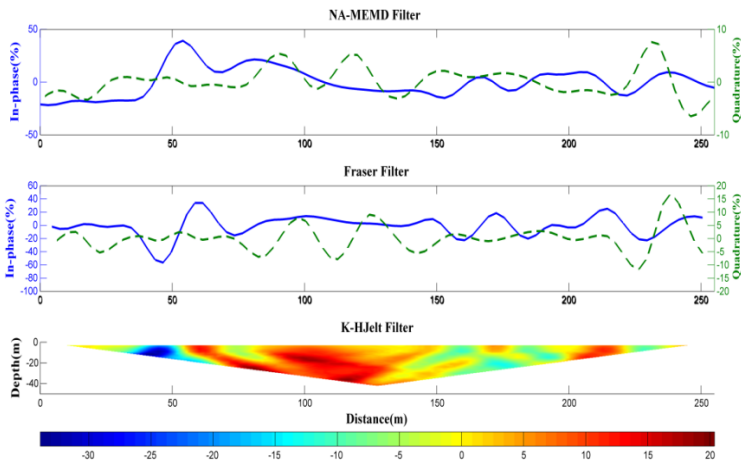
Gambar 20. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 2 dengan frekuensi 22 Khz



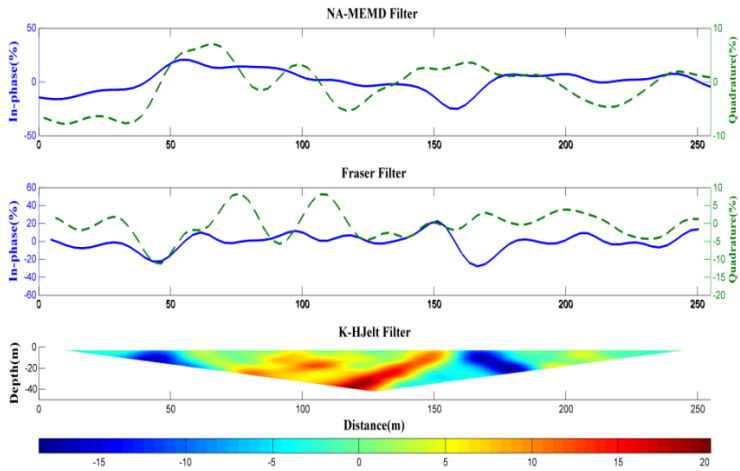
Gambar 21. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 2 dengan frekuensi 21.9 Khz



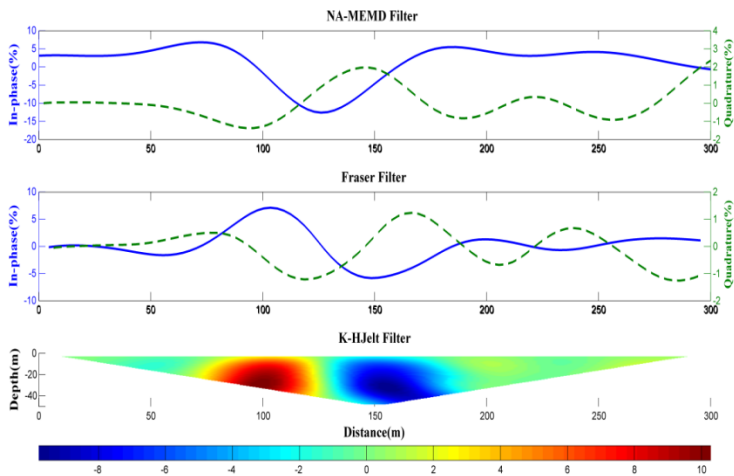
Gambar 22. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 3 dengan frekuensi 22 Khz



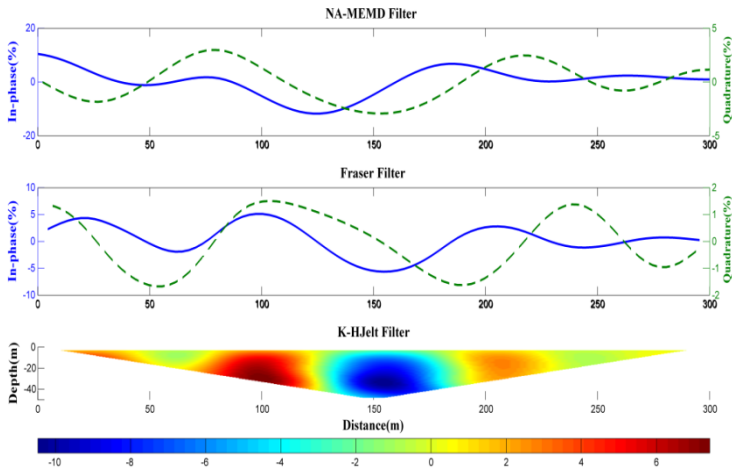
Gambar 23. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 1 dengan frekuensi 22.8 Khz



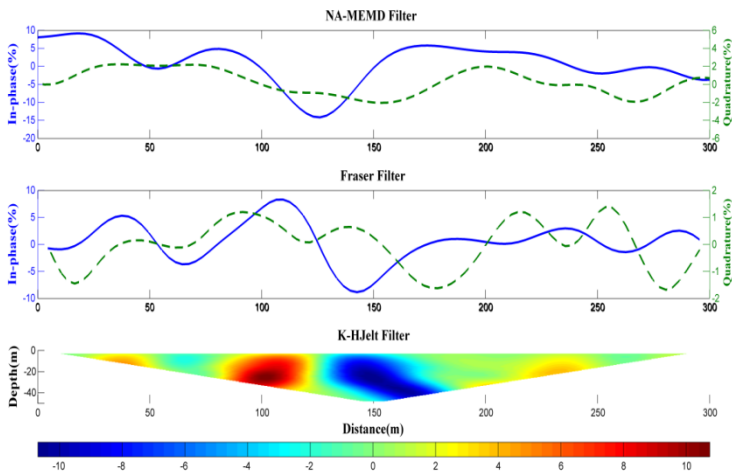
Gambar 24. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 3 dengan frekuensi 21.7 Khz



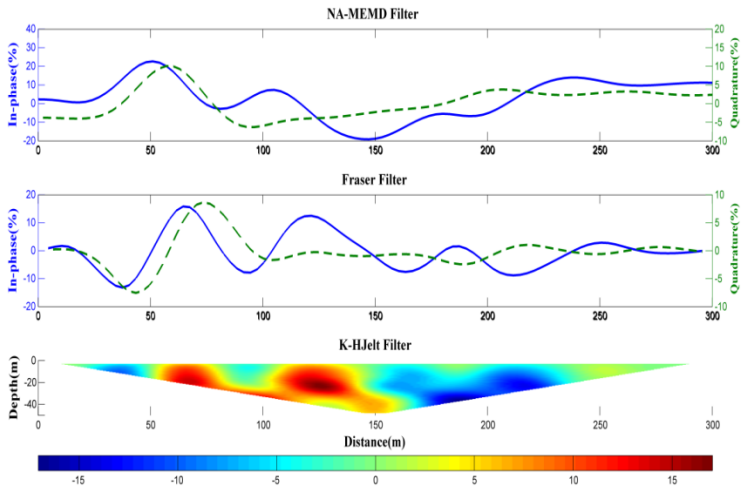
Gambar 25. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 4 dengan frekuensi 15.1 Khz



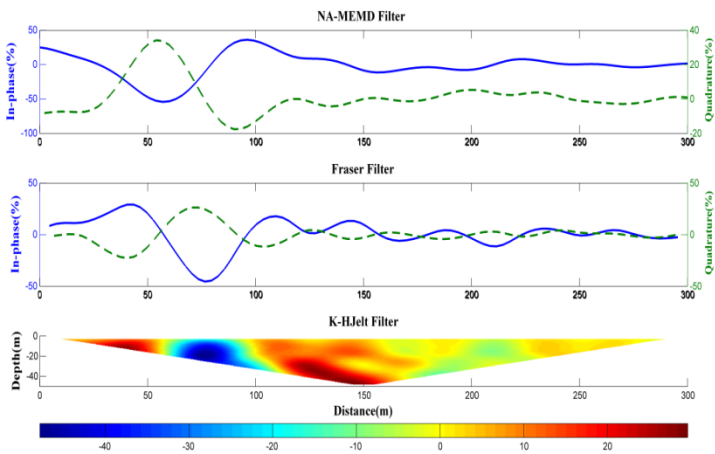
Gambar 26. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 4 dengan frekuensi 17.7 KHz



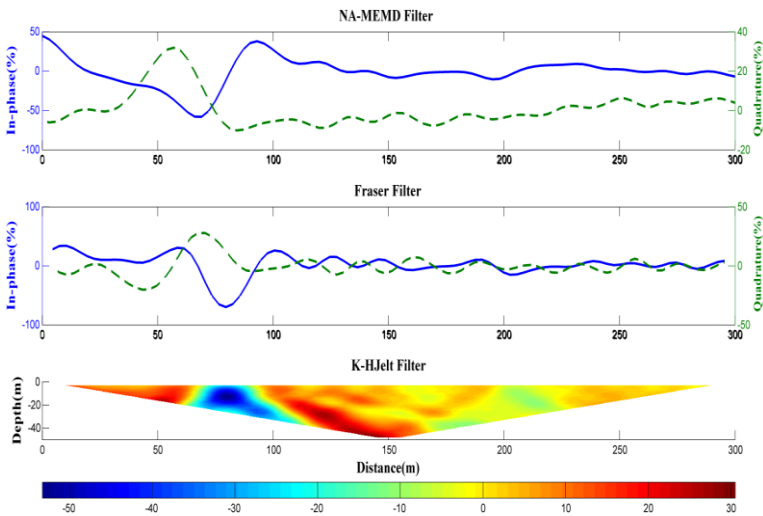
Gambar 27. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 4 dengan frekuensi 15.8 KHz



Gambar 28. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 5 dengan frekuensi 19.2 Khz



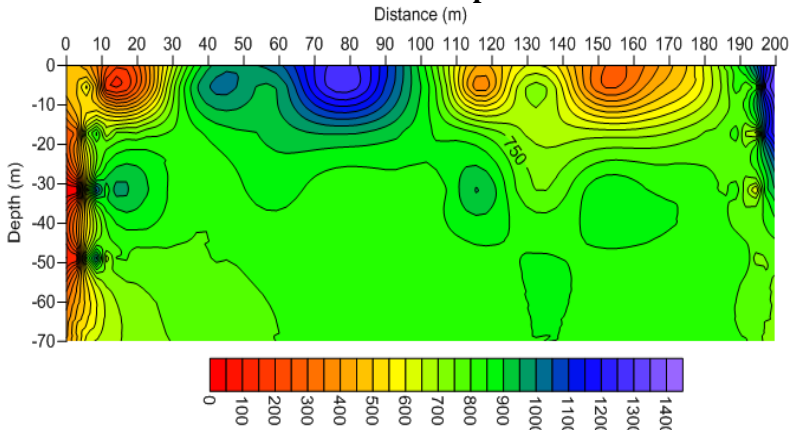
Gambar 29. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 5 dengan frekuensi 15.9 Khz



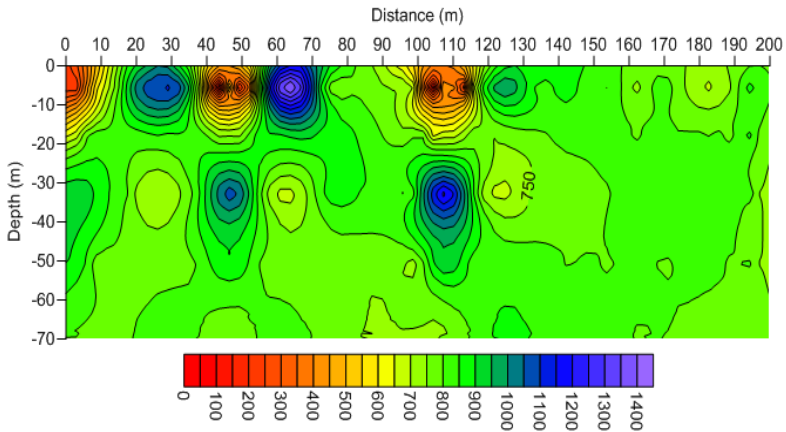
Gambar 30. Hasil filter dengan NA-MEMD, Fraser, Karous-Hjelt pada lintasan 5 dengan frekuensi 15.2 Khz

LAMPIRAN 3

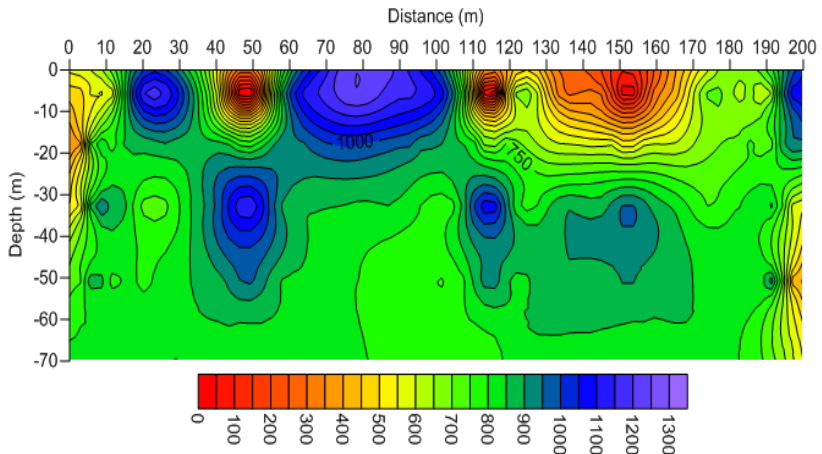
Hasil inversi 2D bawah permukaan



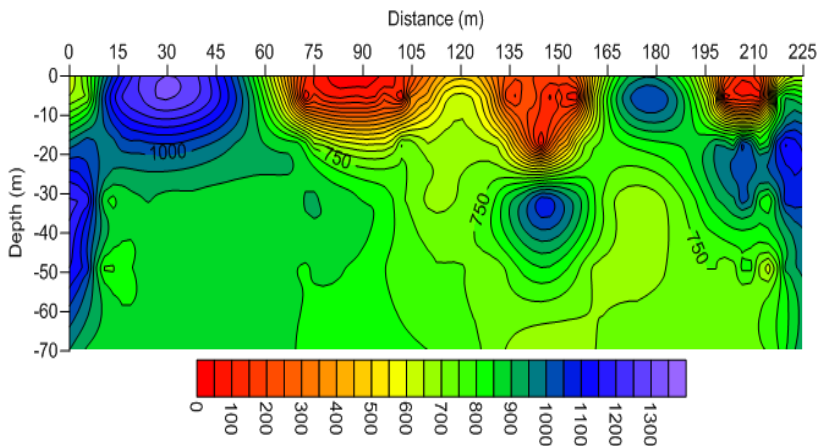
Gambar 31. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 1 dengan frekuensi 23.7 KHz



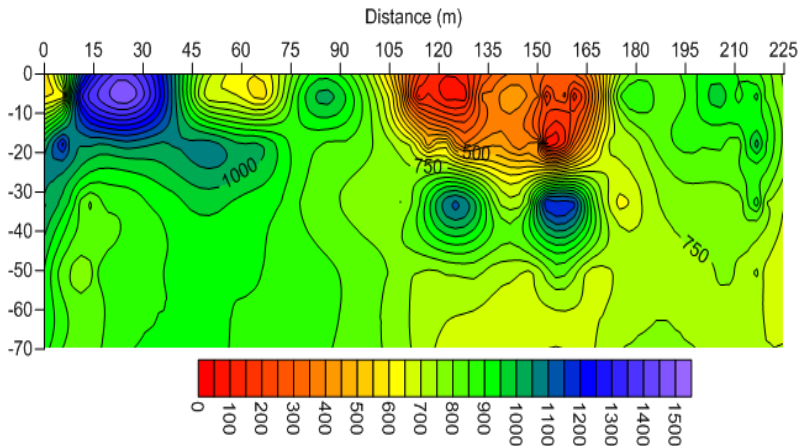
Gambar 32. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 1 dengan frekuensi 22 KHz



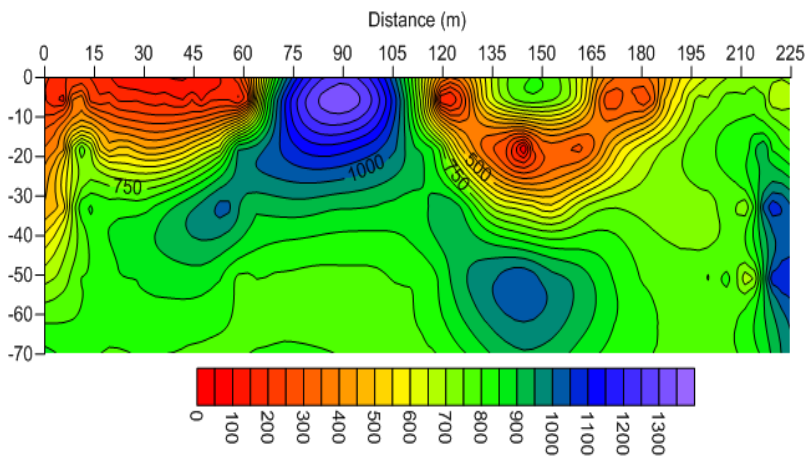
Gambar 33. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 1 dengan frekuensi 21.9 KHz



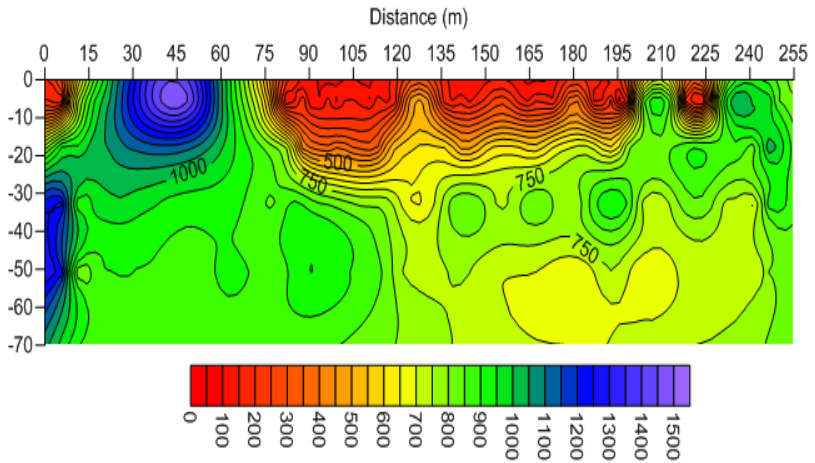
Gambar 34. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 2 dengan frekuensi 23.7 KHz



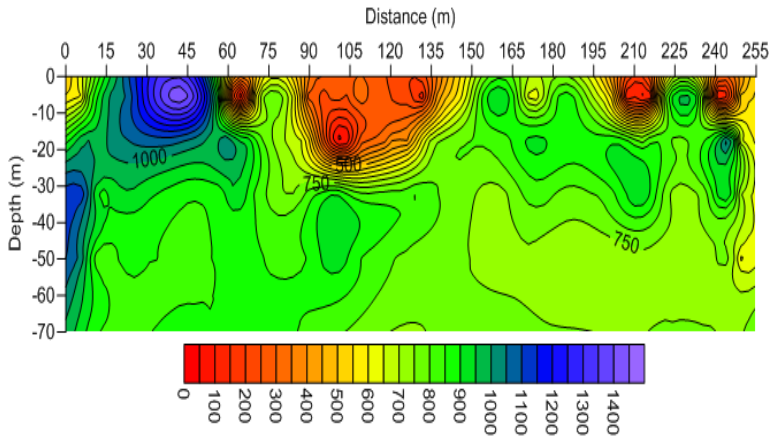
Gambar 35. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 2 dengan frekuensi 22 KHz



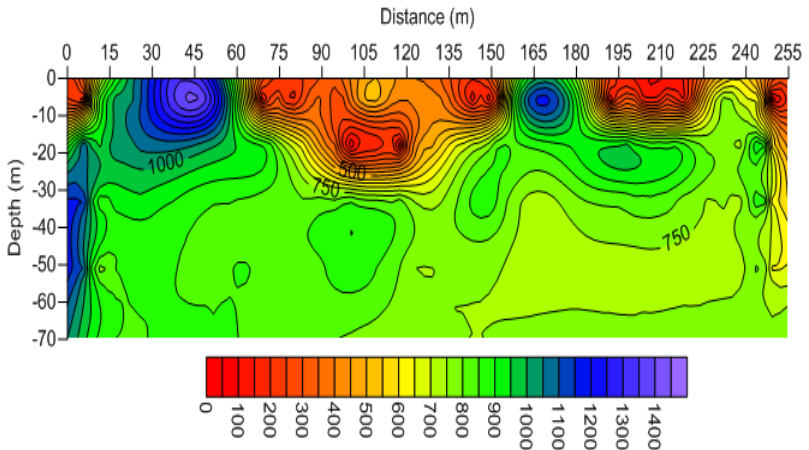
Gambar 36. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 2 dengan frekuensi 21.9 KHz



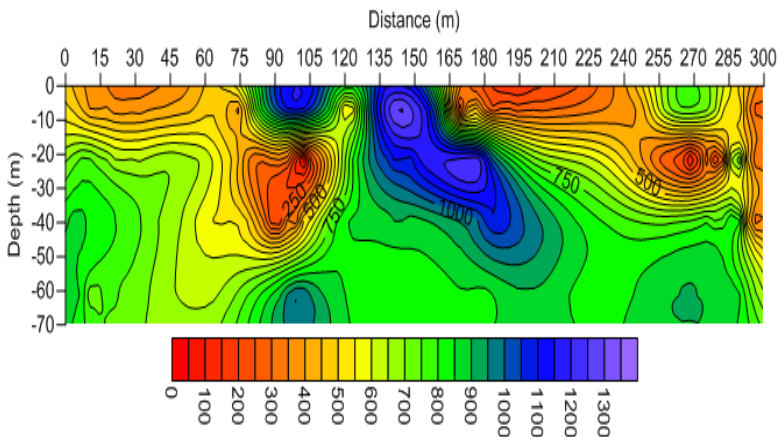
Gambar 37. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 3 dengan frekuensi 22 KHz



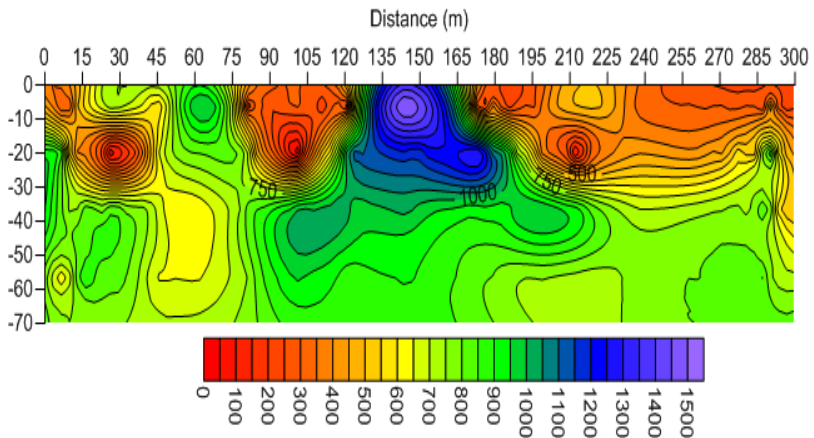
Gambar 38. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 3 dengan frekuensi 22.8 KHz



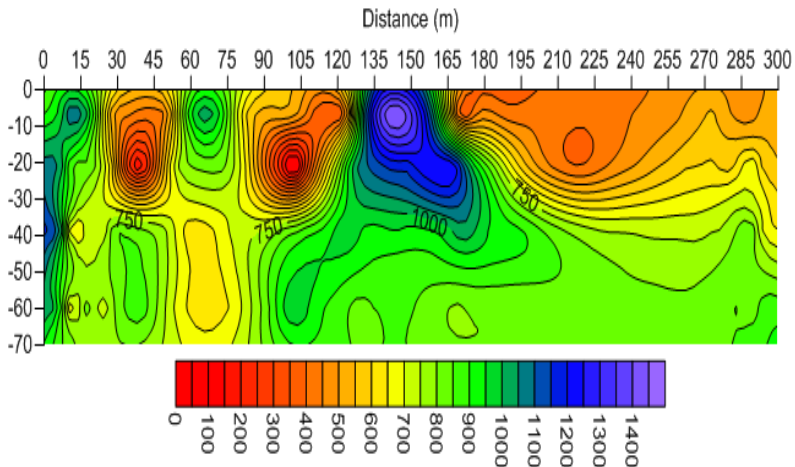
Gambar 39. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 3 dengan frekuensi 21.9 KHz



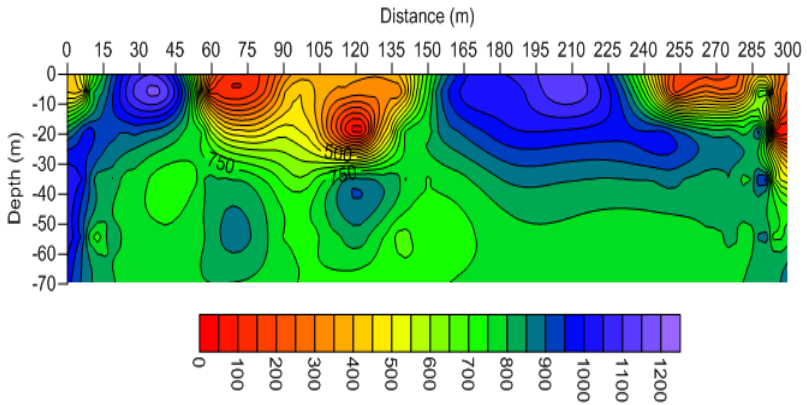
Gambar 40. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 4 dengan frekuensi 15.1 KHz



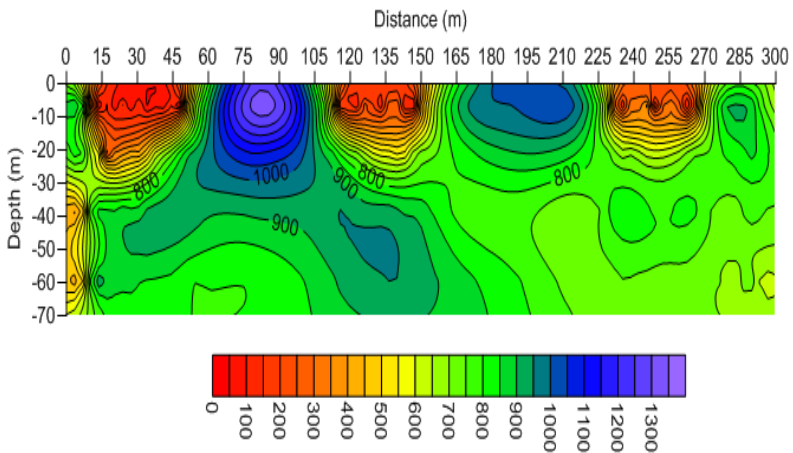
Gambar 41. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 4 dengan frekuensi 17.7 KHz



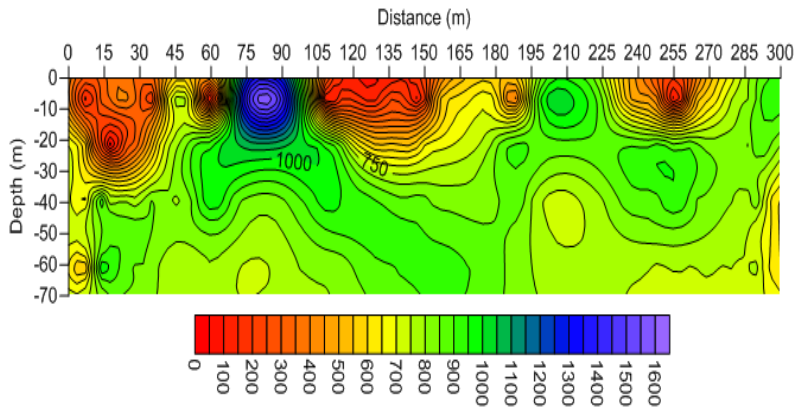
Gambar 42. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 4 dengan frekuensi 15.8 KHz



Gambar 43. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 5 dengan frekuensi 19.2 KHz



Gambar 44. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 5 dengan frekuensi 15.9 KHz



Gambar 45. Hasil inversi 2D bawah permukaan pada lintasan 5 dengan frekuensi 15.2 KHz

LAMPIRAN 4

Dokumentasi pengukuran data lapangan



Gambar 46. Muka goa ngerong Rengel-Tuban



Gambar 47. sinkhole goa ngerong Rengel-Tuban



Gambar 48. sumur galian yang menembus goa ngerong Rengel-Tuban



Gambar 49. pengambilan data di antara bangunan rumah pada lintasan 1



Gambar 50. pengambilan data di dekat bekas galian tambang pada lintasan 1



Gambar 51. Pengambilan data pada jarak 0 di lintasan 2



Gambar 52. Pengambilan data di kebun jagung pada lintasan 2



Gambar 53. Pengambilan data di bekas tambang pertama pada lintasan 2



Gambar 54. Pengambilan data didalam bekas tambang kedua pada lintasan 2



Gambar 55. Pengambilan data di kebun pohon jati pada lintasan 3



Gambar 56. Pengambilan data ketika menaiki bukit karst pada lintasan 3



Gambar 57. Pengambilan data ketika berada di cekungan bukit pada lintasan 3



Gambar 58. Pengambilan data ketika di atas bekas tambang pada lintasan 3



Gambar 59. Pengambilan data ketika dekat dengan amblesan bukit pada lintasan 3



Gambar 60. Pengambilan data pada jarak 0 dilintasan 4



Gambar 61. Pengambilan data ketika berada di lubang galian kecil pada lintasan 4



Gambar 62. Pengambilan data tepat di amblesan yang terhubung pada Gambar 59 pada lintasan 4



Gambar 63. Pengambilan data dekat tambang kapur pada lintasan 4



Gambar 64. Pengambilan data pada jarak 0 di lintasan 5



Gambar 65. pengambilan data pada lintasan 5



Gambar 66. Pengambilan data ketika menaiki bukit karst pada lintasan 5



Gambar 67. Amblesan bukit kasrt dekat dengan lintasan 5



Gambar 68. Dekat bekas tambang kapur pada lintasan 3

Biodata Penulis



Penulis dilahirkan di Bogor, 12 Nopember 1993, merupakan anak keempat dari 4 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SDN Pasir Gunung Selatan III Depok, SMP Kartika XI-1 Jakarta-Timur dan SMAN 106 Jakarta-Timur. Setelah lulus dari SMAN tahun 2011, Penulis bekerja dan mempersiapkan ujian SNMPTN selama setahun. Pada 2012,

penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di jurusan Fisika FMIPA-ITS pada tahun 2012 dan terdaftar dengan NRP. 1112100099. Di jurusan Fisika FMIPA-ITS ini Penulis mengambil Bidang Geofisika. Penulis sempat aktif di kegiatan organisasi seperti Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMASIKA), aktif sebagai Asisten Laboratorium Fisika Dasar dari 2014-2016, aktif sebagai asisiten dosen Fisika Dasar dari 2015-2016, aktif di beberapa kegiatan olahraga yang di selenggarakan oleh BEM FMIPA dan UKM Basket ITS.